



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

INGENIERÍA EN GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA

TRABAJO FINAL DE GRADO

LEVANTAMIENTO 3D DE UNA ESTACIÓN DE METRO A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS CAPTURADOS CON LÁSER ESCÁNER TERRESTRE (TLS).

Proyectista/s: Óscar Pérez Tejero

Director/es: María Amparo Núñez Andrés

Saturio Delgado Medina

Convocatoria: Noviembre-Diciembre 2014

Abstract

This work stems from the need of documenting graphically the Collblanc Metro Station. It is an agreement between the Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB) and Transports Metropolitans de Barcelona (TMB).

Due to its magnitude, the station is divided into two different projects. On the one hand, the platform and railway zone and on the other hand, the main lobby. The access stairs area to the platform is common to both projects. The student Alexandre Ruiz Jordana develops the Project consisting of main lobby and the access stairs to the platform and it is called “Aixecament 3D d’una estació de metro a partir de núvols de punts capturades amb láser escàner terrestre (TLS)”. The project consisting of platform, railway zone and access stairs to the platform is being dealt with in this document.

This practicum’s goal is to carry out a 3D survey of Collblanc Metro Station, supported by the topographic network referencing the work in the ED50 reference system and in the UTM 31N projected coordinates. The heights are orthometric and the geoid used is the UB91. The laser scanner technique is applied to the massive capture of the station data. After that the special data processing is being carried out by means of specific software. Plan views, cross and longitudinal section, orthoimages and one video will be the result of this three-dimensional model.

Attached to the memory there is an annex and a cd which includes calculations and plans that have been necessary for the execution of this Final Degree Project.

Índice

Abstract.....	1
1 Introduction	5
2 Station Location and History.....	7
3 Field works	11
3.1 Previous works.....	11
3.2 Data collection	12
4 Office works.	17
4.1 Computation of itineraries.	17
4.2 Errors and tolerances	19
4.3 Compensación por mínimos cuadrados	21
4.4 Análisis de los resultados.....	25
4.5 Radiación dianas	29
5 Nube de puntos	31
5.1 SCENE.....	32
5.1.1 Preprocesado de todos los escaneos.	33
5.1.2 Creación de objetos de referencia.....	35
5.1.3 Filtrado de los escaneos.....	40
5.1.4 Transformar la nube de puntos	43
5.1.5 Agregar color a los escaneos	46
5.1.6 Exportar nube de puntos	47
5.2 POINTTOOLS	48
5.2.1 Eliminación de puntos	48
5.2.2 Extracción de perfiles y ortoimágenes.....	49
6 Resultados obtenidos	53
6.1 Perfiles transversales.....	53
6.2 Perfiles longitudinales.....	53
6.3 Planta	54
7 Conclusiones.....	55
8 BIBLIOGRAFIA	57
9 Información entregada en soporte digital	59
10 Anejos.....	61
Anejo 1: Especificaciones FARO.....	63
Anejo 2: Ajuste por mínimos cuadrados	65
Anejo 3: Tabla T-student.....	83
Anejo 4: Reseñas de las bases	85
Anejo 5: Parte inglesa traducida al castellano	107
11 Planos	121

1 Introduction

This project is developed thanks to the cooperation agreement with Transports Metropolitans de Barcelona. This option is interesting for TMB because they only have the 3D survey of the railway area, being thus able to insert the data obtained from the station to their own database.

The goal is to get a 3D survey of one station belonging to the TMB Metro Network, from which planes, orthoimages and videos will be obtained. To do so, secondary objectives have been defined: the establishment of a support network, the treatment of point clouds and the generation of orthoimages.

To get the three-dimensional station model, the laser technique is used, which provides great definition due to the large amount of points obtained and a relevant saving of time in data collection. The existing topographical network provides support to reference all the project in the ED50 reference system, by using UTM 31N projected coordinates and orthometric height (referenced to the average sea-level in Alicante).

The station 3D survey is divided into two projects. On the one side the platform and the railway zone, and on the other hand the main lobby. The access stairs area to the platform is common to both projects.

The project consisting of platform, railway zone and access stairs to the platform is being dealt with in this document. The project which consists of the main lobby and the access stairs to the platform is carried out by Alexandre Ruiz Jordana.

As a result, a three-dimensional georeferenced model is achieved from which plans, orthoimages and a video allowing us to take information of the station are obtained. The results are useful for Transports Metropolitans de Barcelona because they update and geo-reference the station graphic information.

2 Station Location and History.

Collblanc is the Metro Station selected to implement the project. This one is part of the Line 5 in Barcelona's Metro.

It was projected in 1954, when Barcelona's City Council was planning the creation of a new Metro Line. On November 7th, 1964, the company Dragados y Construcciones started the construction of the Sants-Collblanc section, formerly called San Ramón. Finally, on November 3rd, 1969, the Line called Transversal Alto was opened, currently known as Line 5, which ran between the stations of Rambla Catalunya (currently Diagonal) and San Ramón (currently Collblanc).

Because of an extension of the Line Pubilla Cases in 1973, it was renamed Line V.

In 1982, the station changed its name to Collblanc and the Line V adopted the Arabic numbers and became known as Line 5.



Image 2.1: Collblanc Station picture in the year 1968.

At present, Barcelona's Metro Line 5 begins in Cornellà and ends in Vall d'Hebrón station. It has 26 stations and 18.9 km length.

Línea 5 - Metro de Barcelona 2014





Image 2.3: Tour Line 5 (TMB Viewer).

Collblanc's Station is located under 'Carretera de Collblanc' street, between Travessera de les Corts and Francesc Layret street. It consists of two lobbies, one at each end point. The first one is placed on the East side and has two entrances. The Access 1 is by Francesc Layret Street and the Access 2 by the Doctor Martí Julià Street. The second lobby is found on the West side and it only has one access by Sant Ramón street (Access 3). The different accesses mentioned before are shown in image 2.5.



Image 2.4: Satellite Image of Collblanc Station (Google Maps).

The two lobbies have vending machines and access controls. The access from the lobbies to the tunnels area is by stairs and escalators. The railways are formed by two lines with side platforms without any gap between them.



Image 2.5 Image of the Station Entrances(VISSIR3 ICGC).

3 Field works

There is an inspection of the working area to perform the project.

The field work is divided into two parts: previous works allowing the definition of the methodology to follow and the necessary resources and data gathering, both topographical and laser scanner.

3.1 Previous works

In order to plan the necessary works, a visit to the station is needed. During the visit, the location of the placements with the scanner is being studied as well as the installation of checkpoints (targets) required to geo-reference the cloud captured by the laser scanner.

It is also studied the location of the placements with the laser scanner. To allocate the device, areas with hidden parts are taken into account and a maximum distance between scans no longer than 20 meters.

Targets are printed on paper and come in three sizes, from 12 x 12 cm, 8,5 x 8,5 cm and 6 x 6 cm. The size choice is carried out bearing in mind the distance the scanner is: longer the distance, bigger the target. To plan the localization of the targets, we must be aware that in each scanner placement, there has to be displayed a minimum of four targets. Later, the targets are set in the position shown in image 3.1.3.



Image 3.1.1: Type of targets used.



Image 3.1.2: Left: G1 target placed in the bottom part of the platform
Right: M3 target placed on the top of the dome at the beginning of the stairs.

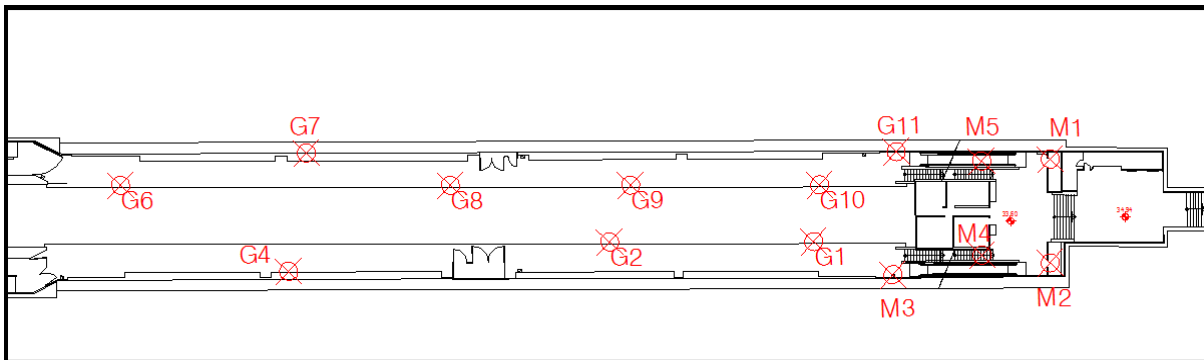


Image 3.1.3: Targets Location Drawing.

3.2 Data collection

- Survey reference network

To coordinate the targets that allow us to georeference this work, two traverse can be found, a main one which is closed, and another one framed within the former mentioned. Both of them are interconnected with the bases of the TMB survey reference network.

From each base where it's placed, readings are carried out to all the possible traverse vertexes. These are done at least three times to avoid errors occurring. Visual checks are performed following the Bessel's rule and multiple reciprocal observations are made to obtain two measures between the vertexes.

The closed loop traverse is the main route that goes along the station, exterior area included. It is composed of 15 bases, its beginning is BR7 and its angular reference is BR72. BR7 and BR72 vertexes are part of the TMB Network and they are considered fixed.

Table 3.2.1: UTM (ED50) coordinates and orthometric heights, BR72 and BR7 vertices unit dimensions in meters

	X	Y	H
BR72	426405,336	4581045,735	29,257
BR7	426484,392	4581051,873	29,090

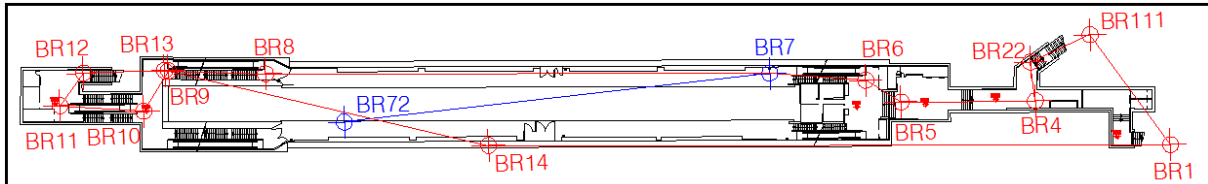


Image 3.2.1: Closed loop traverse image.

The framed traverse is the secondary route that goes across the main lobby and the street access. It is composed of 6 bases, its home is BR4 and its reference is BR5. It passes through the different intermediate bases, being BR1 its ending, and it has a closed-angle at BR14.

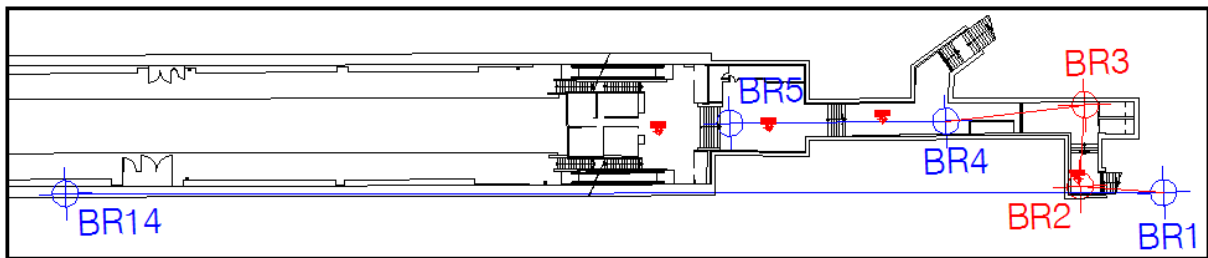


Image 3.2.2: Framed traverse image.

Besides the two traverses, there are also free placements to be able to give coordinates to some of the targets that are not visible from the traverses' vertexes.

The device used in the observation is a total Topcon GPT 9001A Station, whose features are shown in Table 3.2.2.

Table 3.2.2: Station Features

The station features		
Increases	30 X	
Sensitivity	3 cc	
Appreciation	6 cc	
Sensitivity level prism	8'	
Precision station	2 "	
Error in distance	2 mm	+/- 2 ppm

-Laser Scanner

The laser scanner technology uses laser waves to determine the distance existing to an object. This allows you to capture a high density point cloud quickly and after its treatment, it provides a three-dimensional model as a result, from which CAD drawings, orthoimages, videos, etc can come out.

The laser scanner used is FARO Focus 3D S 120. (Annex 1: FARO Specifications.) This sensor uses the flight time method, which is based in the calculation of the distance into the elapsed time, from the emission to the reception of the beam.

The way of working is similar to the total Station. The scanner is placed and then the scanner of the area of interest is being made, always overlapping consecutive areas and trying to cover hidden areas from some of the placements. The scans are static.

The connection of the scans is performed through targets and spheres. The spheres do not have coordinates, they are only used to create a continuous model. The targets have coordinates, and with them the model is being georeferenced. These elements serve as common elements that are recurrent in the different scanned areas and therefore, as connecting elements for the different files generated with the scans.

The targets are observed from the vertexes of the topographic network with the total station. Thus, afterwards, the scans made can be georeferenced.

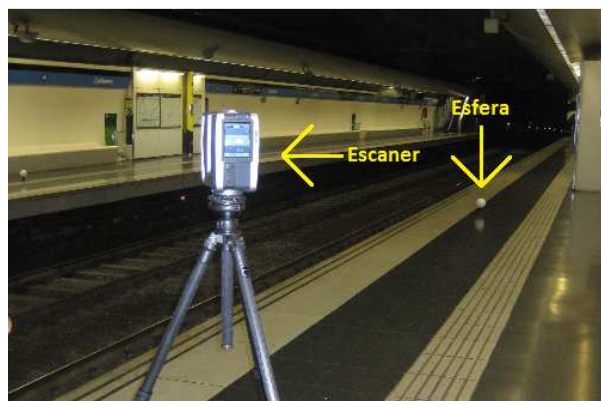


Image 3.2.3: Laser Scanner image with the spheres set.

A total of 25 scans are performed throughout the station. For each scan, the recording time is approximately 9 minutes, which it is divided into 6 minutes to scan the area and 3 minutes to take pictures. In this project, 13 of them are used.

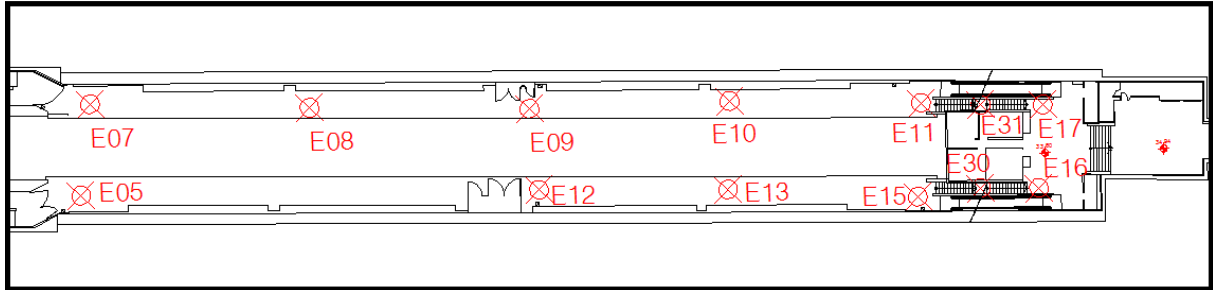


Image 3.2.4: Scan Placement Location Drawing (railways, platform and access stairs area).

4 Office works.

Below the cabinet works carried out from the data obtained in the work field and the bases provided by TMB are described.

All the coordinates are in the UTM 31N, ED50 system of reference and orthometric heights. This system is being used because it is the one established in the TMB topographic Network.

4.1 Computation of itineraries.

To calculate the approximate vertexes coordinates, the data observed in the field is taken as the beginning.

- Planimetric calculation.

The closed loop traverse has BR7 and BR72 as fixed vertex. Because they are two vertexes with known coordinates, the azimuth between them can be calculated and the BR7 vertex disorientation, Σ_{BR7} , could be known.

$$\sum BR7 = \theta_{BR7}^{BR72} - LH_{BR7}^{BR72}$$

From the azimuths and the reduced distances of each section (Dr), the increases in X and Y from each vertex (Δx e Δy) are obtained.

$$\Delta x = Dr \cdot \sin \theta$$

$$\Delta y = Dr \cdot \cos \theta$$

Once the approximate coordinates are obtained, it is calculated the anamorphosis coefficient K of each section to get the reduced distances UTM (D_{UTM}) to the projection

With these distances, the approximate coordinates of the different vertexes are calculated again. To calculate the framed traverse, compensated coordinates obtained after adjusting the closed route by least squares are used.

Table 4.1.1: UTM 31N (ED50) Coordinates approximated from the traverses.

Vértice	X(m)	Y(m)
BR7	426484,392	4581051,873
BR6	426502,112	4581049,889
BR5	426508,509	4581045,604
BR4	426533,324	4581044,907
BR22	426532,691	4581052,147
BR111	426543,915	4581056,839
BR1	426558,038	4581035,795
BR14	426431,858	4581040,401
BR13	426372,451	4581056,579
BR12	426357,418	4581056,681
BR11	426352,859	4581050,777
BR10	426368,294	4581049,168
BR9	426373,168	4581056,507
BR8	426391,085	4581055,283
BR7	426484,387	4581051,903
BR3	426549,361	4581046,177
BR2	426548,488	4581036,905

-Altimetric calculation.

To get the dimensions for each vertex, the increases in height (Δz) are calculated. Approximate dimensions of each vertex are obtained with these increases together with the BR7 orthometric height. The two traverse in block are fit.

Table 4.1.2: Approximate Dimensions to the traverse.

Vértice	H(m)
BR7	29,090
BR6	33,534
BR5	34,873
BR4	36,019
BR22	36,026
BR111	40,079
BR1	39,721
BR14	43,094
BR13	44,877
BR12	40,235
BR11	40,224
BR10	36,212
BR9	36,209
BR8	29,279
BR7	29,076
BR3	36,240
BR2	36,904

4.2 Errors and tolerances

Los errores y tolerancias en planimetría y altimetría se estudian por separado. Una vez los resultados de los errores de cierre que se obtienen están dentro de la tolerancia, que lo están, se procede a la compensación.

- Planimetry

When calculating errors in planimetry, accidental errors are being considered, from which angular tolerance and tolerance in coordinates are being calculated.

The angular error (e_a) is the quadratic component of verticality, aim, direction and reading errors.

Angular tolerance  $T \leq e_a \sqrt{2n}$

being " n " the number of sections and " e_a " the angular error

Tolerance in coordinates  $T = \sqrt{E_l^2 + E_t^2}$
 $E_{Total} \leq T$

being " E_t " the transverse error and " E_l " the longitudinal error

$$E_{Total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

being " E_{Total} " the error in coordinates

The closed loop traverse angle-closure error is -0,0123 g and for the framed traverse is -0,0153 g, their respective tolerances are 0,0326 g and 0,0469 g.

The closure error in coordinates for the closed loop traverse is 0,030 m and for the framed traverse is 0.017 m, and their respective tolerances are 0,162 m and 0,099 m.

This tolerance is obtained by the characteristics of the instruments and the method used. Since errors in closing occurring enter tolerance, compensation can be performed.

- Altimetry

To perform the calculation of errors in altimetry, several accidental error have been taken into account.

The maximum error in Z (e_z) is the quadratic error component e_{tD}, e_m, e_{tV} y e_i .

$$e_z = \sqrt{e_{tD}^2 + e_m^2 + e_i^2 + e_{tV}^2}$$

Siendo “ e_{tD} ” error en el término t debido al error en la medida de la distancia, “ e_m ” el error de altura de mira, “ e_i ” el error en la medida de altura de instrumento y “ e_{tV} ” error en el término t debido al error en la medida del ángulo vertical.

$$T \leq e_z \sqrt{2} \rightarrow \text{Between the reciprocal slopes}$$

The error of closure in dimension with the closed loop traverse is 0,014 m and for the framed traverse is 0,001 m, and their respective tolerances are 0.024 m and 0.009 m.

This tolerance is obtained from the instruments features and the method used. Since closure errors produced affect tolerance, compensation can be made.

The setting applied is by the indirect observation of least squares method.

4.3 Compensación por mínimos cuadrados

La compensación por mínimos cuadrados se realiza separando la componente planimétrica de la altimétrica.

-Ajuste planimétrico

El ajuste en planimetría se realiza de forma independiente para cada una de las poligonales. Primero se compensa la poligonal cerrada y después la poligonal encuadrada, pues se apoya en las coordenadas ya compensadas de la cerrada.

Se emplean ecuaciones de ángulo y ecuaciones de distancia.

-Observación angular

$$d\alpha_{ca} = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta x_{i-1}} \cdot dx_{i-1} + \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta x_i} \cdot dx_i + \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta x_{i+1}} \cdot dx_{i+1} + \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta y_{i-1}} \cdot dy_{i-1} + \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta y_i} \cdot dy_i + \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta y_{i+1}} \cdot dy_{i+1}$$

$$a_{i-1} = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta x_{i-1}} = \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2}$$

$$a_i = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta x_i} = - \left[\frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i(i+1)}^2} + \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2} \right]$$

$$a_{i+1} = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta x_{i+1}} = \frac{y_{i+1} - y_i}{l_{i(i+1)}^2}$$

$$b_{i-1} = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta y_{i-1}} = - \frac{x_i - x_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2}$$

$$b_i = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta y_i} = \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i(i+1)}^2} + \frac{x_i - x_{i-1}}{l_{(i-1)i}^2}$$

$$b_{i+1} = \frac{\delta\alpha_{ca}}{\delta y_{i+1}} = - \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{i(i+1)}^2}$$

Por consiguiente la expresión general de la forma lineal de observación angular es:

$$a_{i-1} \cdot dx_{i-1} + a_i \cdot dx_i + a_{i+1} \cdot dx_{i+1} + b_{i-1} \cdot dy_{i-1} + b_i \cdot dy_i + b_{i+1} \cdot dy_{i+1} = \alpha_o - \alpha_{ca} + R_\alpha = U + R_\alpha$$

-Observación distanciométrica

$$l_{ca}^2 = l_{ij}^2 = (x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2$$

$$dl_{ca} = dl_{ij} = \frac{1}{l_{ij}} \cdot \left[(y_j - y_i) \cdot dy_j - (y_j - y_i) \cdot dy_i + (x_j - x_i) \cdot dx_j - (x_j - x_i) \cdot dx_i \right]$$

El ajuste por mínimos cuadrados se resuelve de forma matricial cumpliendo el siguiente sistema normal:

$$A \cdot X = u + R$$

$$A^T \cdot P \cdot A \cdot X = A^T \cdot P \cdot u$$

$$X = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot u$$

-Características de las matrices de los ajustes.

- A (matriz de diseño): Para la poligonal cerrada se establecen 15 ecuaciones de ángulo y 14 de distancia con 26 incógnitas. Para la poligonal encuadrada Se establecen 4 ecuaciones de ángulo y 3 de distancia con 4 incógnitas.
- U (vector de términos independientes): Es la diferencia entre los ángulos y distancias observadas y los calculados. Sus unidades son angulares (cc) y métricas (m).
- P (matriz de pesos): En la diagonal están los pesos de cada observación. Se considera los pesos de las observaciones de ángulo (P (a)) y los pesos de las observaciones de distancia (P (d)) en función del error angular y del error en distancia en cada tramo.

$$P(a) = \frac{1}{\left(\sqrt{\left(e_{a \ i}^{i+1} \right)^2 + \left(e_{a \ i}^{i-1} \right)^2} \right)^2} \quad P(d) = \frac{1}{\left(\frac{e_d}{\sqrt{2}} \right)^2}$$

- X (vector de incógnitas) Son las correcciones a aplicar a cada una de las coordenadas aproximadas.

Tabla 4.3.1: Correcciones vértices en metros.

Vértice	dX	dY
BR6	0,001	0,000
BR5	0,001	0,000
BR4	0,002	0,000
BR22	0,002	0,000
BR111	0,002	0,001
BR1	0,003	0,001
BR14	0,003	-0,003
BR13	0,003	-0,005
BR12	0,003	-0,006
BR11	0,004	-0,006
BR10	0,004	-0,008
BR9	0,005	-0,009
BR8	0,005	-0,012
BR3	0,003	0,001
BR2	0,004	0,006

Como resultado del ajuste planimétrico obtenemos las cotas que se recogen en la tabla 4.3.2.

Tabla 4.3.2: Coordenadas UTM 31N (ED50) compensadas

Vértice	X(m)	Y(m)
BR6	426502,113	4581049,889
BR5	426508,510	4581045,604
BR4	426533,326	4581044,907
BR22	426532,693	4581052,147
BR111	426543,917	4581056,839
BR1	426558,041	4581035,796
BR14	426431,861	4581040,397
BR13	426372,454	4581056,573
BR12	426357,421	4581056,675
BR11	426352,863	4581050,772
BR10	426368,297	4581049,160
BR9	426373,174	4581056,498
BR8	426391,091	4581055,271
BR3	426549,364	4581046,178
BR2	426548,491	4581036,909

Ajuste altimétrico

Para el ajuste en altimetría se realiza la compensación de forma conjunta de las dos poligonales. A partir de las observaciones obtenidas en campo se obtienen unas cotas y unos desniveles de los puntos del itinerario. Como las cotas son las incógnitas y los desniveles son los observables, se entiende que la ecuación lineal es:

$$Z_A^B = Z_B - Z_A$$

El cálculo matricial se resuelve de la misma manera que para el ajuste planimétrico:

$$A \cdot X = u + R$$

$$A^T \cdot P \cdot A \cdot X = A^T \cdot P \cdot u$$

$$X = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot u$$

A continuación se detallan las dimensiones de las matrices:

- A (matriz de diseño): tiene una dimensión de 17 filas (número de observaciones) por 15 columnas (número de incógnitas).
- U (vector de términos independientes): tiene una dimensión de 17 filas. Está compuesto por desniveles y cota conocida (BR7)

- P (Matriz pesos): en la diagonal están los pesos de cada observación. En función de la compensación cuadrática del error máximo en Z de los desniveles. En una nivelación trigonométrica los pesos tienen la expresión:

$$P = \frac{2}{\left(\sqrt{\frac{e_{zA}^2 + e_{zB}^2}{4}} \right)^2} \rightarrow \text{si } e_{zA}^B = e_{zB}^A \rightarrow \frac{1}{\left(\frac{e_z}{\sqrt{2}} \right)^2} = \frac{2}{e_z^2}$$

- X (vector de incógnitas) tiene una dimensión de 15 filas. Son directamente las cotas compensadas.

Como resultado del ajuste altimétrico obtenemos las cotas que se recogen en la tabla 4.3.3.

Tabla 4.3.3: Cotas ortométricas compensadas.

Vértice	H(m)
BR6	33,536
BR5	34,875
BR4	36,019
BR22	36,027
BR111	40,079
BR1	39,725
BR14	43,104
BR13	44,886
BR12	40,245
BR11	40,236
BR10	36,225
BR9	36,223
BR8	29,291
BR3	36,241
BR2	36,905

El cálculo completo del ajuste así como los resultados se encuentran en el Anejo 2.

4.4 Análisis de los resultados

Se lleva a cabo una valoración de los resultados que se obtienen tanto en planimetría como en altimetría. Estos resultados se detallan a continuación:

-Planimetría

Cada una de las coordenadas tiene un error asociado, este viene dado por la varianza del observable de peso unidad y la matriz cofactor de las incógnitas:

$$\text{Varianza} \quad \sigma_0^2 = \frac{V^T \cdot P \cdot V}{e - i} \quad \text{donde, } e = \text{número de ecuaciones}$$

$$i = \text{número de incógnitas}$$

$$V = A \cdot x - u$$

$$\text{Desviación típica} \quad \sigma_0 = \sqrt{\sigma_0^2}$$

El resultado de la desviación típica para la poligonal cerrada es de 0,5689 y para la encuadrada es de 5,0486.

Una vez se hace el cálculo y se compensan los vértices sumándoles las correcciones a las coordenadas aproximadas, se obtienen las coordenadas compensadas que conforman la red y sus respectivos errores asociados a cada coordenada con una fiabilidad del 68% (desviación típica) a partir de la matriz varianza-covarianza.

Tabla 4.4.1: Errores asociados en metros de cada vértice con una fiabilidad del 68%.

Errores asociados (68% de fiabilidad)			
σ_{x6}	0,001	σ_{y6}	0,002
σ_{x5}	0,001	σ_{y5}	0,002
σ_{x4}	0,002	σ_{y4}	0,004
σ_{x22}	0,002	σ_{y22}	0,004
σ_{x111}	0,002	σ_{y111}	0,005
σ_{x1}	0,002	σ_{y1}	0,005
σ_{x14}	0,002	σ_{y14}	0,003
σ_{x13}	0,002	σ_{y13}	0,004
σ_{x12}	0,002	σ_{y12}	0,004
σ_{x11}	0,001	σ_{y11}	0,004
σ_{x10}	0,001	σ_{y10}	0,003
σ_{x9}	0,001	σ_{y9}	0,002
σ_{x8}	0,001	σ_{y8}	0,001
σ_{x3}	0,006	σ_{y3}	0,002
σ_{x2}	0,006	σ_{y2}	0,004

Para calcular el error con una probabilidad del 95% se necesita la tabla de distribución T-Student en la que se debe entrar con 3 grados de libertad ya que es la diferencia entre número de ecuaciones y número de incógnitas (Anexo 3: Tabla T-student). El valor es de 2,3534.

Este valor multiplicado por cada uno de los obtenidos en la fiabilidad del 68% se obtiene los errores de cada una de las coordenadas con una probabilidad del 95%.

El error asociado a cada vértice en planimetría esta entre 3-15 mm en X y 3-12mm en Y. Los más grandes son los que se obtienen en la poligonal encuadrada.

Tabla 4.4.2: Errores asociados en metros de cada vértice con una fiabilidad del 95%, unidades en metros.

Errores asociados (95% de fiabilidad)			
σ_{x6}	0,003	σ_{y6}	0,004
σ_{x5}	0,004	σ_{y5}	0,005
σ_{x4}	0,004	σ_{y4}	0,010
σ_{x22}	0,004	σ_{y22}	0,010
σ_{x111}	0,004	σ_{y111}	0,011
σ_{x1}	0,004	σ_{y1}	0,012
σ_{x14}	0,004	σ_{y14}	0,007
σ_{x13}	0,004	σ_{y13}	0,009
σ_{x12}	0,004	σ_{y12}	0,010
σ_{x11}	0,003	σ_{y11}	0,010
σ_{x10}	0,003	σ_{y10}	0,006
σ_{x9}	0,003	σ_{y9}	0,005
σ_{x8}	0,002	σ_{y8}	0,003
σ_{x3}	0,015	σ_{y3}	0,005
σ_{x2}	0,015	σ_{y2}	0,009

Para finalizar el análisis de los errores se calculan las elipses de error. Se obtienen los semiejes de la elipse de error en cada punto y las orientaciones partiendo de los valores de la matriz varianza-covarianza. Las fórmulas que expresan los semiejes y la orientación son:

$$a^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \right]$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2} \right]$$

$$\tan 2\omega = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_y^2 - \sigma_x^2}$$

Donde “a” es el semieje mayor, “b” es el semieje menor y “ ω ” es el ángulo que forma el semieje mayor con el eje de las abscisas.

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.4.3: Cálculo de los ejes de las elipses de error con una fiabilidad del 68% y del 95% de las poligonales.

	Elipses de error				
	(68% de fiabilidad)		(95% de fiabilidad)		ω (°)
	a (m)	b (m)	a (m)	b (m)	
BR6	0,002	0,001	0,004	0,003	7,3764
BR5	0,002	0,001	0,005	0,003	17,7182
BR4	0,004	0,002	0,010	0,004	8,7210
BR22	0,004	0,002	0,010	0,004	-1,9839
BR111	0,005	0,002	0,011	0,004	-2,0120
BR1	0,005	0,002	0,012	0,004	6,4188
BR14	0,003	0,002	0,007	0,004	0,1350
BR13	0,004	0,002	0,009	0,004	3,3576
BR12	0,004	0,002	0,010	0,004	3,4587
BR11	0,004	0,001	0,010	0,003	-4,7260
BR10	0,003	0,001	0,006	0,003	-12,0415
BR9	0,002	0,001	0,005	0,003	4,6092
BR8	0,001	0,001	0,003	0,002	2,3063
BR3	0,006	0,002	0,015	0,005	-3,5874
BR2	0,006	0,004	0,015	0,009	2,0436

-Altimetría

Para la altimetría se realiza la compensación de las dos poligonales juntas el número de ecuaciones es de 17 y el número de incógnitas es de 15. El resultado de la desviación típica es de 0,18507.

Una vez se realiza el cálculo, se obtienen las cotas compensadas de los vértices que conforman la red y sus respectivos errores asociados con una fiabilidad del 68% (desviación típica) a partir de la matriz varianza-covarianza.

Tablas 4.4.4: Errores asociados de las cotas de cada vértice con una fiabilidad del 68%, unidades en metros

Vértice	Error asociado
BR6	0,001
BR5	0,001
BR4	0,001
BR22	0,001
BR111	0,001
BR1	0,001
BR14	0,001
BR13	0,001
BR12	0,002
BR11	0,002
BR10	0,001
BR9	0,001
BR8	0,001
BR3	0,001
BR2	0,001

Para calcular el error con una probabilidad del 95% se necesita la tabla de distribución T-Student en la que se debe entrar con 2 grados de libertad ya que es la diferencia entre número de ecuaciones y numero de incógnitas. (Anexo 3: Tabla T-Student). El valor es de 2,92.

Este valor multiplicado por cada uno de los obtenidos en la fiabilidad del 68% se obtiene los errores de cada una de las coordenadas con una probabilidad del 95%

El error asociado a cada vértice en altimetría esta entre 2-4 mm, se puede decir que es un error pequeño.

Tablas 4.4.5: Errores asociados de las cotas de cada vértice con una fiabilidad del 95 %, unidades en metros.

Vértice	Error asociado
BR6	0,003
BR5	0,003
BR4	0,004
BR22	0,004
BR111	0,004
BR1	0,004
BR14	0,004
BR13	0,004
BR12	0,004
BR11	0,004
BR10	0,004
BR9	0,004
BR8	0,002
BR3	0,004
BR2	0,004

4.5 Radiación dianas

Las dianas se radian, principalmente, desde los vértices de las poligonales. En algunos casos no es posible observar las dianas por falta de visibilidad por ello se realizan estacionamientos libres que permiten su observación. Tras calcular sus coordenadas aproximadas, son compensados por el método de observaciones indirectas de mínimos cuadrados. Donde la matriz de diseño (A) tiene dos ecuaciones de ángulo y tres de distancia con dos incógnitas.

Las coordenadas de las dianas se obtienen a partir de las coordenadas compensadas de los vértices de las poligonales y de los vértices de los estacionamientos libre. En la tabla 4.5.1 se muestran las coordenadas de las dianas utilizadas.

Tabla 4.5.1: Coordenadas UTM 31N (ED50) y cotas ortométricas de las dianas radiadas.

Punto est.	Diana	X(m)	Y(m)	H(m)
BR7	M3	426487,045	4581039,627	31,549
	G11	426487,942	4581053,091	31,557
	G1	426478,471	4581043,580	28,914
	G2	426455,928	4581044,383	28,943
BR6	BR61	426503,275	4581041,177	33,521
	M1	426504,929	4581051,635	35,944
	M5	426497,342	4581051,712	34,681
	M2	426504,466	4581040,281	36,283
BR73	G10	426479,333	4581049,769	28,886
	G9	426458,489	4581050,514	28,939
LIBRE1	G8	426438,583	4581051,235	29,003
	G7	426422,798	4581055,363	32,000
	G6	426402,168	4581052,602	29,120
	G4	426420,353	4581042,477	32,114
BR61	M4	426496,981	4581041,400	35,147

Los cálculos detallados se encuentran en el archivo Excel “Datos” en el CD adjunto en la memoria.

5 Nube de puntos

La captura de datos con láser escáner se realiza con el FARO Focus 3D S 120. El escáner se estaciona en 4 posiciones en el andén 1 y en 5 posiciones en el andén 2, además de en los tramos entre escaleras de acceso a los andenes y en la parte superior de las escaleras. De cada estacionamiento se obtiene una nube de puntos que debe ser procesada.

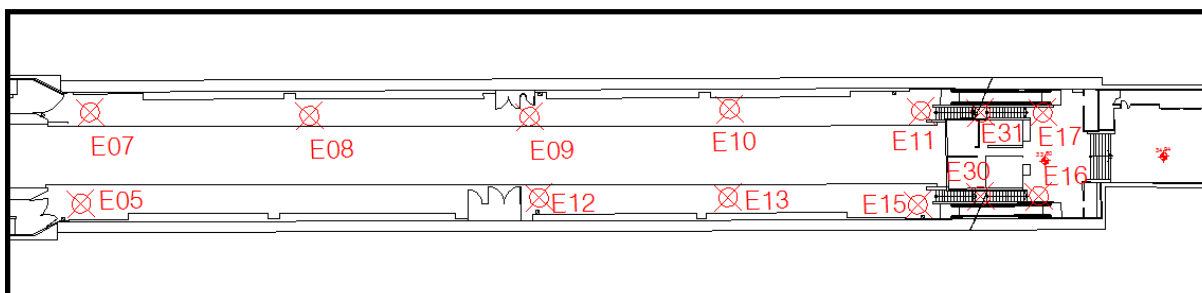


Imagen 5.1: Plano situación estacionamientos escaneos.

Para llevar a cabo el procesado de la nube de puntos con láser escáner se deben seguir una serie de pasos, detallados en el apartado 5.1.

Se utilizan dos *software* diferentes para el procesado de las nubes de puntos. El primero se denomina SCENE, y pertenece a la casa de Faro. Con SCENE se unen los archivos registrados con el láser escáner. El segundo es POINTTOOLS que permite hacer tratamientos de la nube de puntos.

Los pasos que se realizan con cada uno de ellos son:

SCENE

- Preprocesado de los escaneos para hallar correspondencias entre escaneos.
- Creación de objetos, puntos y planos de referencia para la unión de los escaneos.
- Filtrado de los escaneos para eliminar posibles puntos erróneos.
- Aplicar transformación a la nube de puntos.
- Agregar color a los escaneos
- Exportación de la nube de puntos.

POINTTOOLS

- Eliminación de los puntos no deseados.
- Extracción de secciones y ortoimágenes.

5.1 SCENE

Para empezar a trabajar con SCENE, en primer lugar se debe iniciar un nuevo proyecto. En el directorio donde se deposita este proyecto, se crea una carpeta con diferentes apartados en las que se encuentra todo el proyecto.

El siguiente paso es la creación de cada uno de los escaneos que se utilizaran como espacio de trabajo local (*local workspace*) y guardarlos cada uno en una carpeta conjunta. Una vez se realiza esto, se puede importar todos los escaneos como *local workspace* al proyecto.

El programa utiliza por defecto una serie de parámetros para la referenciación de las nubes de puntos. Estos se deben cambiar para que la unión de los escaneos sea correcta.

Los parámetros que se cambian (imagen 5.1) son en la búsqueda de correspondencias: se seleccionan el primero que sirve para que busque puntos que se correspondan en todos los escaneos, que use las normales de los tableros para colocar los escaneos, que utilice la brújula para orientarlos en el espacio, se usa el altímetro para que la unión sea correcta y por último se selecciona que utilice la dirección principal de los escaneos para que los coloque adecuadamente.

También se selecciona el registro fino para que la búsqueda de correspondencias sea comparando el máximo número de puntos encontrados.

Se selecciona que use como objetos usados de unión de escaneos los siguientes puntos de esquina, rectángulos, tableros cuadriculados y esferas.

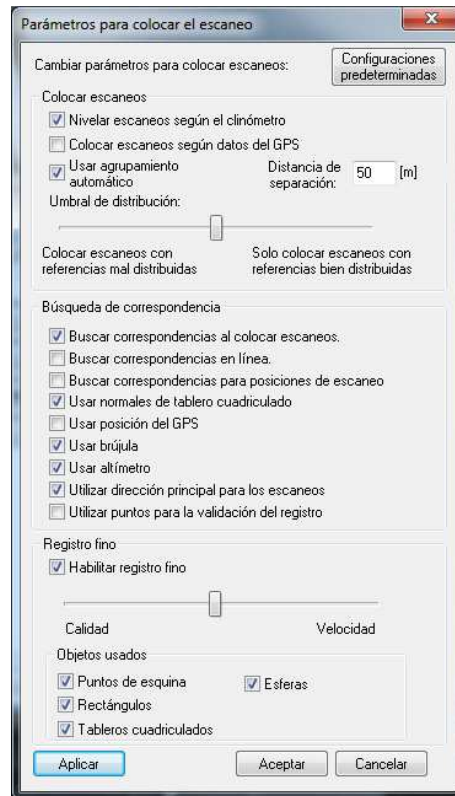


Imagen 5.1 Parámetros para georreferenciar escaneos.

5.1.1 Preprocesado de todos los escaneos.

Para iniciar el procesamiento previo, se hace clic con el botón derecho del mouse en la carpeta de escaneos y se selecciona **Operaciones** ▶ **Preprocesando** ▶ **Procesar escaneos previamente**.

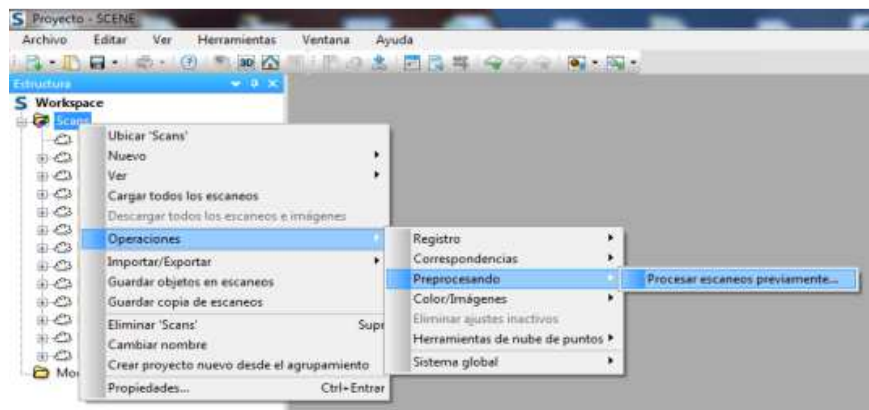


Imagen 5.1.1.1: Aplicar proceso de escaneos

Una vez realizado se abre el menú “*Procesar escaneos previamente*” para seleccionar las opciones de procesamiento que se deben aplicar.

Se selecciona aplicar una serie de filtros que más adelante se explicarán. Además se selecciona que realice una detección de referencias artificiales y naturales. Por último se marca la opción de colocación automática de los escaneos.



Imagen 5.1.1.2: Cuadro de Procesar escaneos previamente.

Una vez se realiza el preprocesado de los escaneos, el resultado es el que se observa en la imagen 5.1.1.3. Como se puede comprobar en esta imagen, los escaneos se colocan de forma incorrecta. Esto se produce porque son muy semejantes entre sí.

El programa detecta tal cantidad de referencias que le es difícil establecer la unión de escaneos. Para evitar este problema, como apoyo a estas referencias encontradas de forma automática se crean otras de forma manual, de este modo se facilita que la unión se realice de forma correcta.

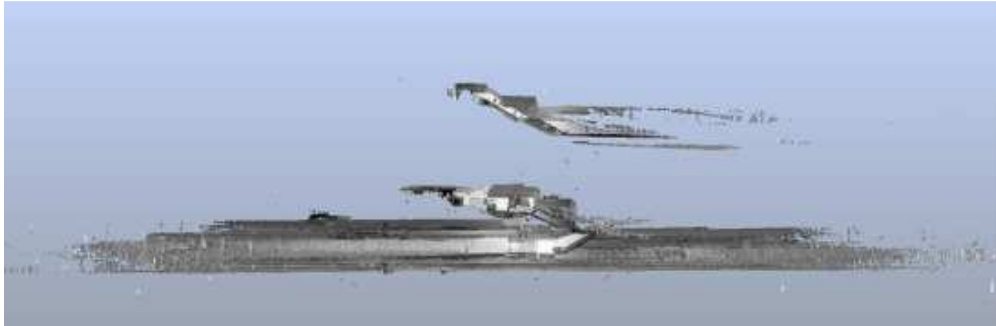


Imagen 5.1.1.3: Resultado del Preprocesado.

5.1.2 Creación de objetos de referencia.

Primero de todo, se establece el escaneo 011 como referencia y se cambian las coordenadas de origen por $X=0$ e $Y=0$, la coordenada Z se deja tal y como esta ya que no afecta para la referenciación de los escaneos. Se establece el 011 como referencia porque es un escaneo que se utiliza en los dos proyectos que se realizan en la estación y así se puede establecer más fácilmente la unión de los dos proyectos.

/Scans/New_Project_Scan_011

Área de escaneo	Sensores	Operación	Operador
Información del escáner	Configuración del escáner	Color	

Escaneo Generalidades Transformación

Tamaño: 10266 x 4267

Datos cargados: ☒

Escaneo de referencia: ☒

Escaneo fijo: ☐

Rango de dist. del escáner: 153.484102 [m]

Posición del escáner: 0 0 -30.634258 [m]

Eje de orientación: -0.001 -0.008 -1

Ángulo de orientación: 90.33811 [°]

Fecha de registro: 28.02.2014 at 02:57:44

Información del origen del escaneo:

Información: Dist. Deviations: 0

Obtener Aplicar Aceptar Cancelar

Imagen 5.1.2.1: Cuadro de características escaneo 011.

Una vez se realiza esto sobre el escaneo 011 está marcado con un icono especial en la vista de estructura.



Imagen 5.1.2.2: Imagen del icono resultante.


Para la creación de objetos, planos y puntos hay dos opciones, una automática que se utiliza en el apartado 5.1.1. y otra opción manual con la que se establecen una serie de objetos característicos para que la unión de los escaneos sea correcta. Se deben crear objetos, planos y puntos de forma manual ya que las referencias que el programa detecta automáticamente son muy parecidas entre sí, por lo tanto la unión de los escaneos no es correcta. El panel para la creación de estos objetos es el que se representa en la imagen 5.1.2.3.



Imagen 5.1.2.3: Herramientas de creación de objetos, planos y puntos.

5.1.2.1 Esferas

Las esferas se utilizan para facilitar la unión de los escaneos, ya que sirven como correspondencias entre escaneos. Se colocaron un total de 22 esferas.

Para seleccionar las esferas de forma manual se utiliza . En nuestro caso se detectan todas las esferas de forma automática, por lo tanto lo único necesario es cambiar los nombres de estas siguiendo un orden según su colocación para que sea común en todos los escaneos.

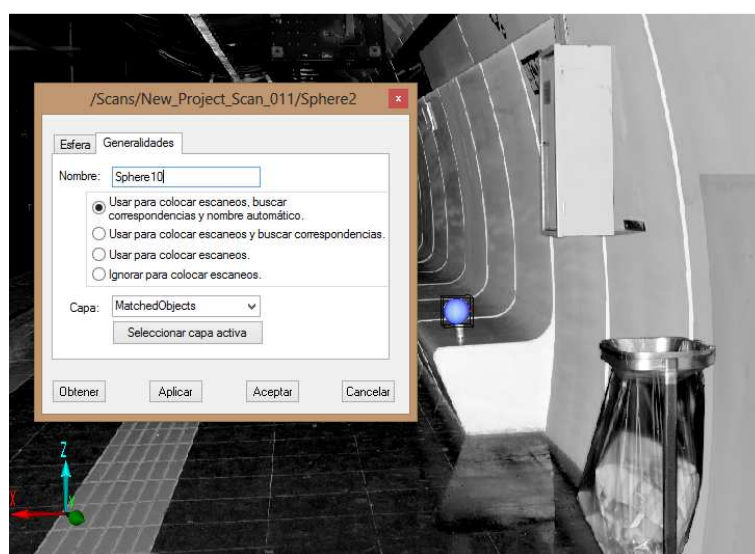



Imagen 5.1.2.1.1: Cuadro de propiedades esfera 10.

5.1.2.2 Dianas

Las dianas sirven para poder georreferenciar el proyecto y también para hacer la unión entre los diferentes escaneos.

Para seleccionar las dianas de forma manual se utiliza . En nuestro caso se detectan todas las dianas de forma automática, por lo tanto lo único necesario es cambiar los nombres de estas según su identificador para que sean comunes para todos los escaneos.

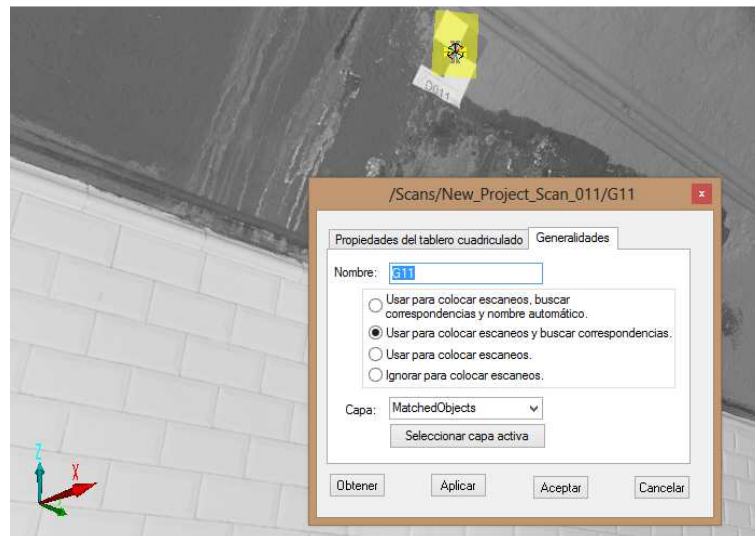



Imagen 5.1.2.2.1: Cuadro de propiedades diana G11.

5.1.2.3 Puntos

Los puntos se utilizan para facilitar la unión de los escaneos, ya que sirven como correspondencias entre escaneos.

Para seleccionar puntos de forma manual se utiliza . En este caso se selecciona el logo de Metro como punto característico puesto que aparece en todo el túnel. Estos puntos se nombran siguiendo un orden según su colocación para que sean comunes en todos los escaneos y sirvan de apoyo para facilitar la unión entre ellos.

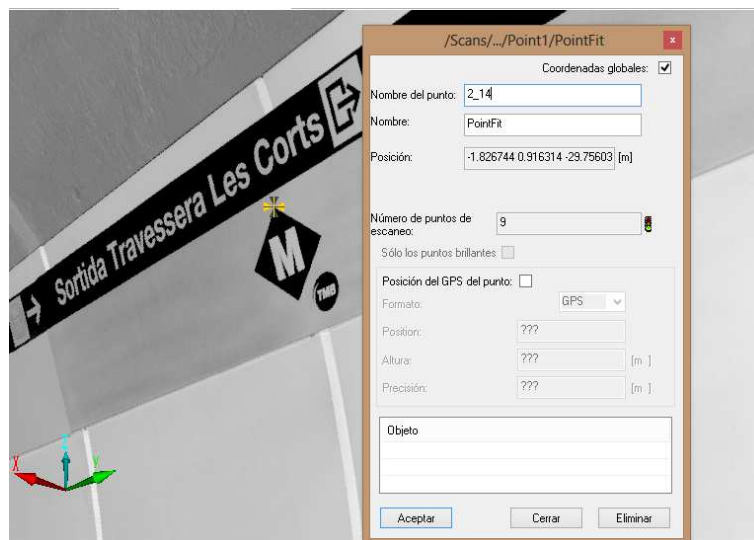



Imagen 5.1.2.3.1: Creación punto con cuadro de propiedades

5.1.2.4 Planos

Para seleccionar los planos de forma manual se utiliza . En este caso no se seleccionan planos. Las nubes de puntos tienen diferentes perspectivas y es muy difícil seleccionar planos que sean idénticos en las diferentes nubes.

5.1.2.5 Unión de escaneos

Una vez se seleccionan todos los objetos de forma manual, se realiza la unión de los escaneos, utilizando los objetos detectados de forma automática y manual.

Para ello se debe abrir el Administrador de escaneos (*ScanManager*), donde se encuentran tres pestañas diferentes.

En la primera pestaña "*ScanManager*" aparece el nombre, el administrador del escaneo, si se usa el clinómetro para nivelar los escaneos...

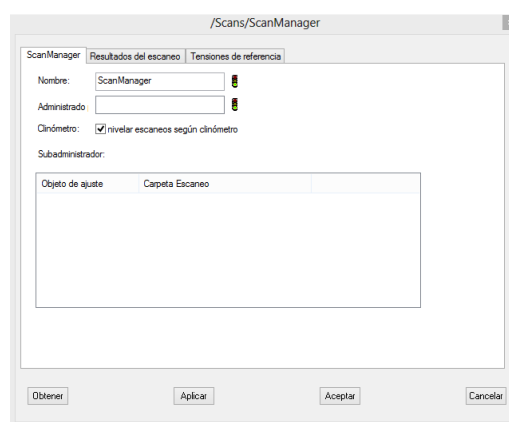


Imagen 5.1.2.5.1: Cuadro ScanManager

En la segunda pestaña "*Resultados del escaneo*" se muestra una lista de todos los ajustes de escaneo realizados cuyo resultado se simboliza con un semáforo. También se puede realizar una vista de correspondencias que abre todos los escaneos con sus correspondencias.

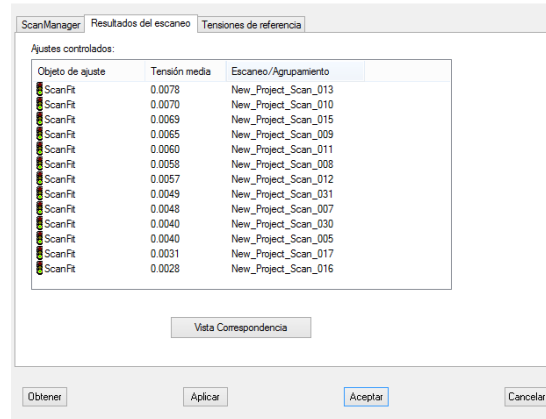


Imagen 5.1.2.5.2: Cuadro Resultados de escaneos

En la tercera pestaña "*Tensiones de referencia*" muestra el valor conocido como *Tensión*. Se define tensión como la distancia mínima entre un punto de una nube y su homólogo en otra nube distinta.

Esta pestaña muestra los valores de tensión de cada punto, plano, objeto. Los valores próximos a cero indican un resultado de unión satisfactorio.

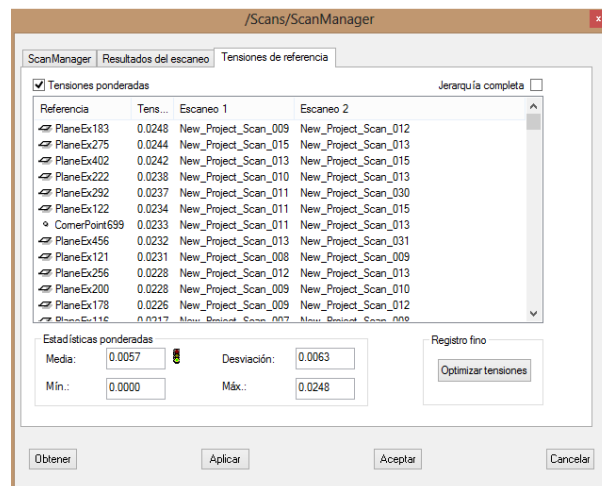





Imagen 5.1.2.5.3: Cuadro Tensiones de referencia

Para realizar la unión de los escaneos se clicla el registro fino. Así se buscan los objetos, puntos y planos homólogos para realizar su unión.

Los objetos de referencia que tengan relaciones de correspondencia con otras referencias estarán marcados con una C verde en su icono en la vista de estructura. Por ejemplo.

Si un objeto tiene un ajuste activo, la calidad general del ajuste con el objeto se simboliza con un semáforo:

-  **Verde:** cumple con todos los criterios de calidad individuales del ajuste.
-  **Amarillo:** al menos uno de los criterios de calidad está comprometido de alguna manera.
-  **Rojo:** al menos uno de los criterios de calidad está gravemente comprometido.

El resultado de unir los escaneos es el que se ve en la imagen 5.1.2.5.4.



Imagen 5.1.2.5.4: Resultado de unión.

5.1.3 Filtrado de los escaneos

Las nubes de puntos son el resultado de millones de mediciones realizadas durante el barrido del objeto y dependiendo del punto medido se alcanzan diversos grados de precisión.

Según el método de medición del escáner, hay distintas causas que influyen en la precisión de la medición:

- Los valores analógicos nunca se pueden determinar con exactitud en un determinado número de puntos; a partir de un cierto número de puntos, el resultado de la medición siempre se desviará del valor verdadero. Esta desviación normalmente es ruido.
- El punto de impacto del láser del escáner no es infinitamente delgado, sino que tiene un cierto diámetro. Por lo tanto, es posible que el láser caiga en parte sobre un soporte y en parte en la pared situada detrás. Así, el escáner también recibe la luz del láser reflejada desde dos puntos distintos que están alejados.

- En algunos escáneres, los resultados de las mediciones solo pueden estar dentro del intervalo de ambigüedad. Sin embargo, si la distancia verdadera de un objeto es mayor que este intervalo de ambigüedad, se mostrará un valor demasiado pequeño como resultado de la medición.

Según el tipo de problema existente en la medición, en ocasiones el punto obtenido no es correcto, pero se pueden aplicar correcciones; pero en muchas ocasiones no se puede corregir y el punto debe ser eliminado.

Con el programa SCENE se pueden utilizar 4 tipos de filtros diferentes para eliminar estos puntos erróneos.

- Filtro para puntos dispersos: Se utiliza para eliminar los puntos de escaneo que se originan al tocar dos objetos con un impacto de láser o sin tocar ningún objeto, por ejemplo el cielo.
- Filtro basado en la distancia: Para eliminar puntos de escaneo en un cierto rango de distancia con respecto al escáner.
- Filtro para puntos de escaneo oscuros: Se utiliza para eliminar puntos de escaneo que tienen demasiado ruido.
- Filtro para suavizar puntos de escaneo: Sirve para minimizar el ruido en las superficies.

Para determinar los filtros idóneos, se realizan pruebas con cada uno de ellos.

Se realizan pruebas con todos los filtros. El filtro que se basa en la distancia se realiza la prueba para determinar la distancia adecuada para el solape entre escaneos. El filtro para puntos dispersos y para puntos oscuros se deja por defecto ya que las pruebas que se realizan no se aprecian cambios en la nube de puntos.

Una vez se realizan estas pruebas se decide que se aplicará los filtros de puntos dispersos, el basado en la distancia y el filtro para puntos de escaneo oscuros.

5.1.3.1 Filtro para puntos dispersos

El filtro para puntos dispersos se aplica para todos los escaneos por igual, como se puede comprobar en la imagen 5.1.1.2 vista anteriormente. Los parámetros que utiliza son:

- El **tamaño de la cuadrícula**, es el tamaño del área que se utiliza para la comparación.
- El **umbral de distancia**, un punto no debe superar esta distancia, sino será eliminado.
- El **umbral de asignación**, es el porcentaje de puntos que deben estar en el área y en el umbral de distancia, sino será eliminado.

5.1.3.2 Filtro basado en la distancia

El filtro basado en la distancia elimina todos los puntos que estén fuera de la distancia escogida. Para este filtro se decide establecer una distancia máxima de 30 metros, para así poder tener una zona de solape entre escaneos. Se tiene que aplicar el filtro escaneo por escaneo.

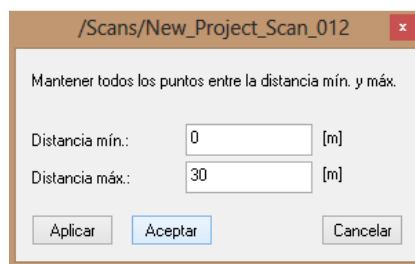


Imagen 5.1.3.2.1: Parámetros filtro de distancia.

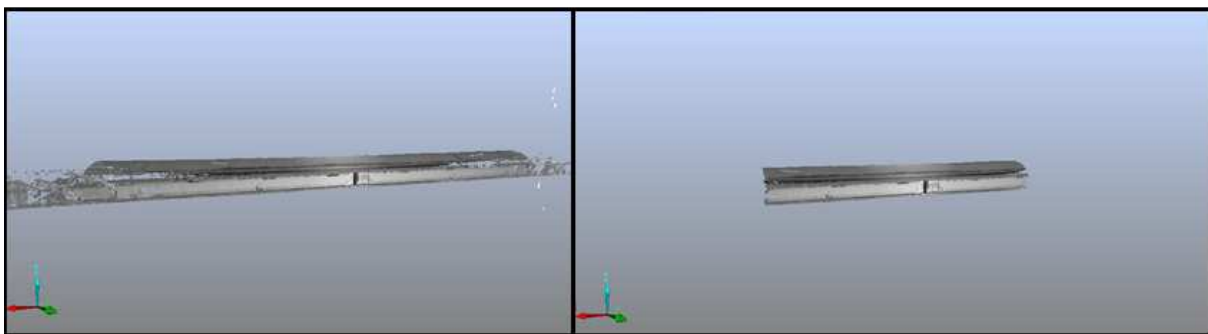


Imagen 5.1.3.2.2: Antes y después de la aplicación de filtro de distancia.

5.1.3.3 Filtro para puntos oscuros

El filtro para puntos oscuros se aplica para todos los escaneos por igual, como se puede comprobar en la imagen 5.1.1.2 vista anteriormente. Los parámetros que utiliza son:

- El valor del **umbral de reflectancia**, que indica el valor de reflexión mínimo que debe tener un punto de escaneo.

5.1.4 Transformar la nube de puntos

Para georreferenciar la nube de puntos se aplica una transformación de 7 parámetros.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \lambda \cdot R \cdot \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} \quad \text{donde, } R = \begin{pmatrix} 1 & \kappa & -\varphi \\ -\kappa & 1 & \omega \\ \varphi & -\omega & 1 \end{pmatrix}$$

Para ello se calcula la transformación con las coordenadas terreno de las dianas y las coordenadas imagen de las dianas.

Se obtiene un vector de translaciones en el espacio (T_x , T_y , T_z), además de una matriz de rotaciones en el espacio (ω , φ , κ) y el factor de escala (λ). Los valores obtenidos se reflejan en la tabla 5.1.4.2.

Tabla 5.1.4.1: Coordenadas terreno UTM 31N (ED50) cotas ortométricas e imagen de las dianas

Diana	Coordenadas Terreno			Coordenadas Imagen		
	X(m)	Y(m)	H(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)
M1	426504,929	4581051,635	35,944	18,013	0,564	-25,116
M2	426504,466	4581040,281	36,283	18,085	-10,780	-24,766
M3	426487,045	4581039,627	31,549	0,710	-12,273	-29,504
M4	426496,981	4581041,400	35,147	10,558	-10,040	-25,899
M5	426497,342	4581051,712	34,681	10,437	0,288	-26,365
G1	426478,471	4581043,580	28,914	-8,039	-8,729	-32,139
G2	426455,928	4581044,382	28,943	-30,601	-9,000	-32,113
G4	426420,353	4581042,477	32,114	-66,061	-12,637	-28,948
G6	426402,168	4581052,602	29,119	-84,731	-3,416	-31,945
G7	426422,798	4581055,363	32,000	-64,250	0,344	-29,062
G8	426438,583	4581051,235	29,003	-48,280	-3,003	-32,058
G9	426458,489	4581050,514	28,939	-28,360	-2,767	-32,114
G10	426479,333	4581049,769	28,886	-7,475	-2,523	-32,166
G11	426487,942	4581053,091	31,557	0,958	1,211	-29,497

Una vez se calcula la transformación, se aplica esta para así obtener coordenadas georreferenciadas en toda la nube de puntos.

Para aplicar la transformación, se clicca con el botón derecho del mouse en la carpeta de escaneos y se selecciona **Propiedades**.

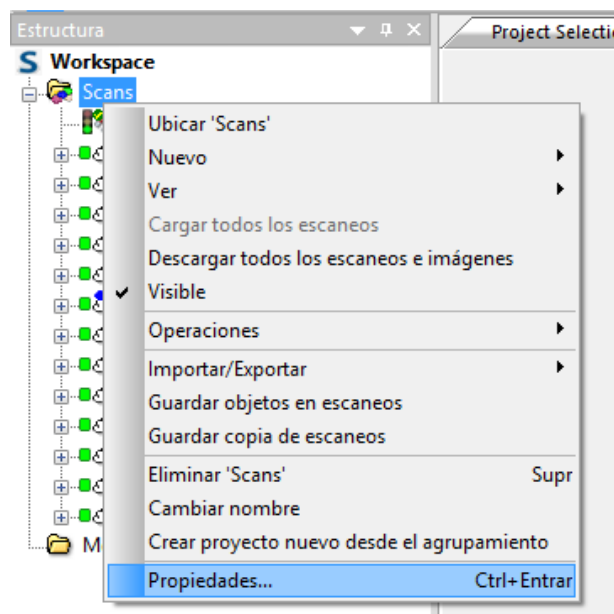


Imagen 5.1.4.1: Acceso al cuadro de Scans

Una vez se realiza esto se abre una ventana de Scans la cual tiene 3 pestañas. La primera que es Generalidades, la segunda que es Transformación y la tercera que es Carpeta.

Se accede a la pestaña de Transformación y en ella se copian los parámetros que se obtienen del cálculo.

A estos parámetros se les aplica una reducción ya que el sistema no admitía valores tan grandes. A la translación en X se le resta 426000 y a la translación en Y se le resta 4580000. Por lo tanto las coordenadas obtenidas tienen esta reducción.

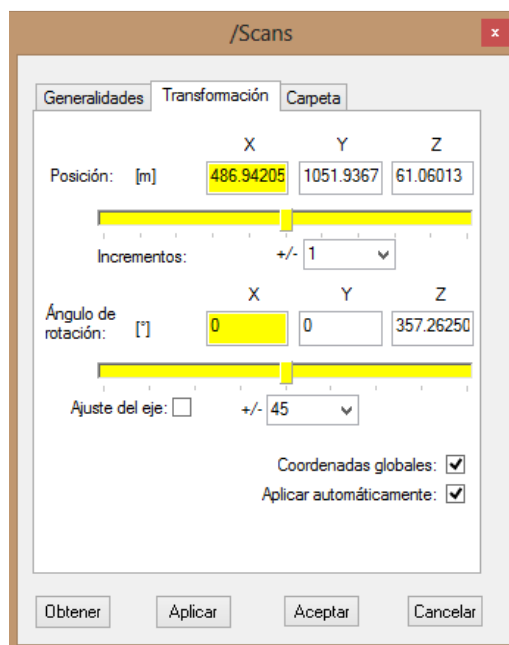


Imagen 5.1.4.2: Cuadro Scans

Tabla 5.1.4.2: Parámetros de transformación.

Parámetros de transformación finales			
Traslación(m)		Giros(g)	
Tx	486,942	Omega	0,000
Ty	1051,937	Phi	0,000
Tz	61,060	Kappa	357,2625

Una vez se calculan los parámetros de transformación se aplican y la nube ya está georreferenciada.

Se realiza una comparación de las coordenadas terreno de las dianas y las coordenadas obtenidas de las dianas una vez aplicada la transformación. Hay una diferencia en X=0-3 cm, Y=1-2 cm y Z=0-1,5 cm. En algún punto la diferencia entre coordenadas es mayor de 3 cm, al ser pocos puntos y no exceder de 5 cm, se considera que las nubes están unidas correctamente.

Tabla 5.1.4.3: Coordenadas terreno UTM 31N (ED50) cotas ortométricas y transformadas de las dianas.

Diana	Coordenadas terreno			Coordenadas transformadas		
	X(m)	Y(m)	H(m)	X(m)	Y(m)	H(m)
M1	504,929	1051,635	35,944	504,960	1051,647	35,938
M2	504,466	1040,281	36,283	504,491	1040,301	36,297
M3	487,045	1039,627	31,549	487,065	1039,644	31,556
M4	496,981	1041,400	35,147	497,009	1041,404	35,161
M5	497,342	1051,712	34,681	497,381	1051,726	34,695
G1	478,471	1043,580	28,914	478,494	1043,602	28,920
G2	455,928	1044,383	28,943	455,947	1044,406	28,944
G4	420,353	1042,477	32,114	420,353	1042,469	32,112
G6	402,168	1052,602	29,120	402,145	1052,572	29,116
G7	422,798	1055,363	32,000	422,782	1055,349	31,998
G8	438,583	1051,235	29,003	438,573	1051,243	29,002
G9	458,489	1050,514	28,939	458,481	1050,527	28,947
G10	479,333	1049,769	28,886	479,353	1049,774	28,894
G11	487,942	1053,091	31,557	487,956	1053,101	31,563

Tabla 5.1.4.4: Diferencias entre coordenadas terreno y transformadas.

Diferencias			
Diana	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$
M1	-0,032	-0,011	0,007
M2	-0,025	-0,020	-0,014
M3	-0,020	-0,017	-0,007
M4	-0,028	-0,005	-0,013
M5	-0,040	-0,014	-0,015
G1	-0,023	-0,021	-0,007
G2	-0,019	-0,023	-0,001
G4	0,000	0,008	0,002
G6	0,023	0,031	0,004
G7	0,016	0,014	0,002
G8	0,010	-0,008	0,001
G9	0,008	-0,013	-0,008
G10	-0,021	-0,004	-0,008
G11	-0,014	-0,010	-0,006
Promedio	0,020	0,014	0,007

5.1.5 Agregar color a los escaneos

El programa SCENE realiza la asignación de color a los escaneos con las imágenes que se han tomado con la cámara fotográfica del láser escáner. Todos los escaneos tienen color excepto el escaneo número 005 ya que esa parte de la estación no tiene una buena iluminación.

Para agregar color a los escaneos, se clicla con el botón derecho del mouse sobre cada escaneo y se selecciona **Operaciones** ▶ **Color/Imágenes** ▶ **Aplicar imágenes**. Este paso se hace para cada escaneo.

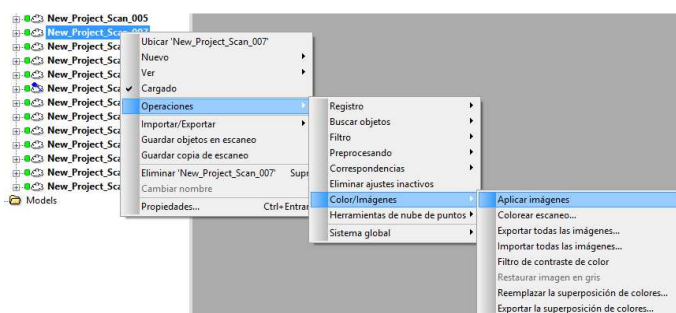
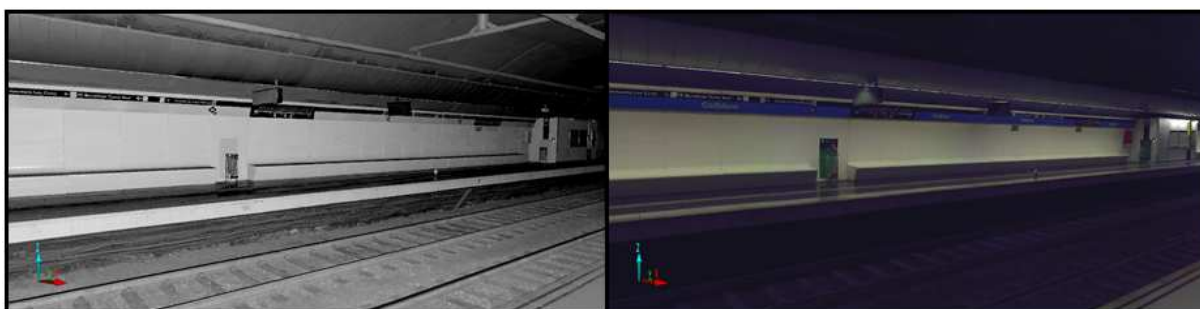


Imagen 5.1.5.1: Acceso para aplicar color



5.1.5.2: Antes y después de aplicar color

5.1.6 Exportar nube de puntos

Para utilizar la nube de puntos de los escaneos en otras aplicaciones, como en sistemas CAD, SCENE ofrece la posibilidad de exportar puntos de escaneo en diversos formatos de datos y registrarlos en un archivo.

Para exportar los escaneos, se clic con el botón derecho del mouse sobre la carpeta *Scans* y se selecciona **Importar/Exportar ► Exportar puntos de escaneo**.

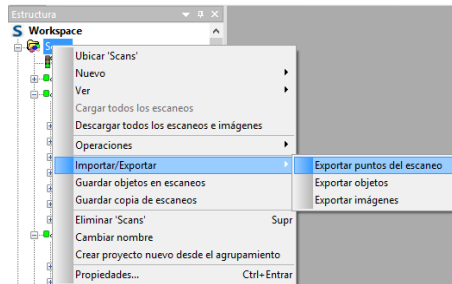


Imagen 5.1.6.1: Acceso para exportar

Una vez hecho esto, se abre la ventana de Exportar puntos de escaneo. En el que se tiene que seleccionar el tipo de formato en el que se desea la nube de puntos. El programa con el que se trabaja más adelante es Pointools que emplea el formato .pod por lo tanto, este sera su formato de salida.

A la hora de exportar se selecciona que exporte el Escaneo completo y que la nube de puntos sea en color y gris.

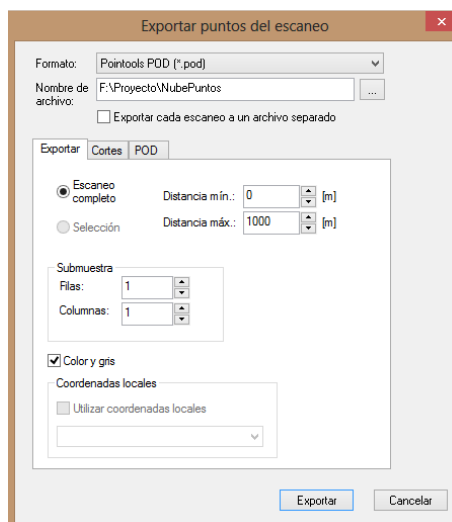


Imagen 5.1.6.2: Cuadro Exportar puntos de escaneo

5.2 POINTTOOLS

Para empezar a trabajar con POINTTOOLS se importa la nube de puntos con extensión .pod.

Para ello se clicca con el mouse sobre **File ▶ Import**.

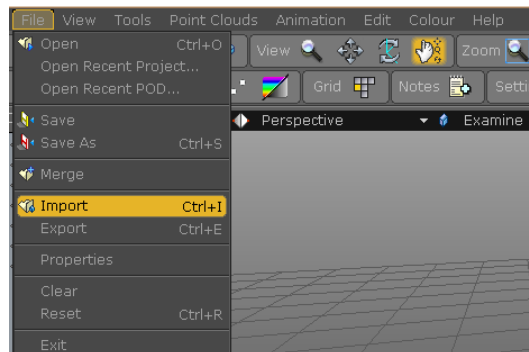


Imagen 5.2.1: Importar nube de puntos.

Una vez abierto el fichero de la nube de puntos, se guarda el trabajo. Las nubes constan de aproximadamente de 493 millones de puntos.

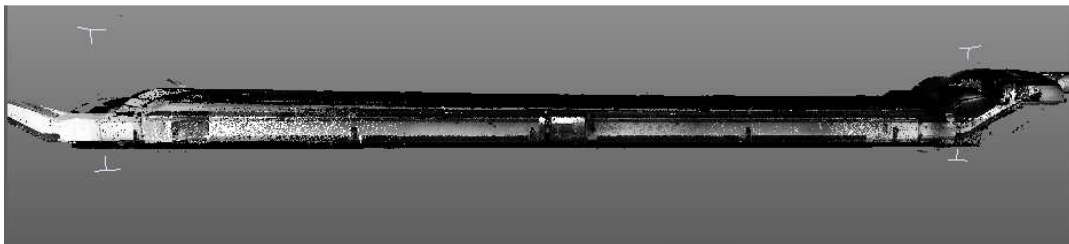


Imagen 5.2.2: Nube de puntos

5.2.1 Eliminación de puntos

La eliminación de puntos es necesaria ya que con SCENE no es posible eliminar todo el ruido que se produce en la toma de datos del láser escáner.

En POINTTOOLS este proceso es sencillo ya que solo se seleccionan los puntos erróneos y se eliminan de la vista. Estos puntos no son eliminados sino que están ocultos.



Imagen 5.2.1.1: Selección de puntos con polígono



Imagen 5.2.1.2: Antes y después de la eliminación de puntos.

5.2.2 Extracción de perfiles y ortoimágenes.

Para la extracción de perfiles y ortoimágenes se define un eje con origen en PK 0+000. A la hora de realizar la extracción de perfiles, la orientación de la nube de puntos debe ser perpendicular a la vista de la cámara para así poder extraer el perfil deseado.

5.2.2.1 Definición de eje y PK 0+000.

Antes de empezar con la extracción de perfiles se define un eje.

Este eje se define en Auto CAD. El eje queda definido por un arco de circunferencia entre 3 puntos colocados a la distancia media entre andenes. Estos puntos son situados al inicio, mitad y final de los andenes.

Una vez queda definido el eje se importa a POINTTOOLS.

Tabla 5.2.2.1.1: Coordenadas de tres puntos del eje.

Coordenadas PK 0+000		
X(m)	Y(m)	Z(m)
426387,341	4581049,789	30
Coordenadas PK 0+060		
X(m)	Y(m)	Z(m)
426447,303	4581047,584	30
Coordenadas PK 0+120		
X(m)	Y(m)	Z(m)
426507,268	4581045,499	30

5.2.2.2 Caja de selección

Para hacer cortes en la nube de puntos se emplea la herramienta para definir una caja de selección.



Imagen 5.2.2.2.1: Herramientas caja de selección.

- El primer icono se utiliza para habilitar o deshabilitar la caja de selección.
- El segundo icono se utiliza para establecer los valores que queremos que tenga esta caja de selección.
- El tercer icono se utiliza para hacer avanzar la caja de selección.
- El cuarto icono se utiliza para hacer retroceder la caja de selección.

Se utiliza el segundo icono para la definición de los valores que tiene la caja de selección. Aparece una nueva ventana con dos pestañas.

- La primera pestaña es la de Rango (*range*) en la que se ven el límite máximo y mínimo que tiene la caja de selección.
- La segunda pestaña es la de Tamaño (*size*) es aquí donde se define el centro de la caja que es el centro de la sección. También se define el tamaño de la caja ancho (Y), alto (Z) y profundidad (X).

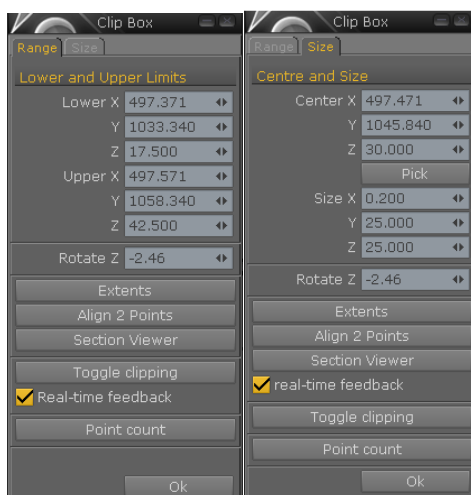


Imagen 5.2.2.2.2: Ventana Caja de selección.

Se calcula el centro de los perfiles transversales cada metro desde el PK 0+000 hasta el PK 0+120. Los cálculos están en el archivo Excel “PK’s Centro de secciones” en el CD adjunto. Una vez se definen los valores de la caja se pulsa el primer icono para habilitar la caja. Una vez habilitada se utiliza el tercer y cuarto icono para avanzar o retroceder.

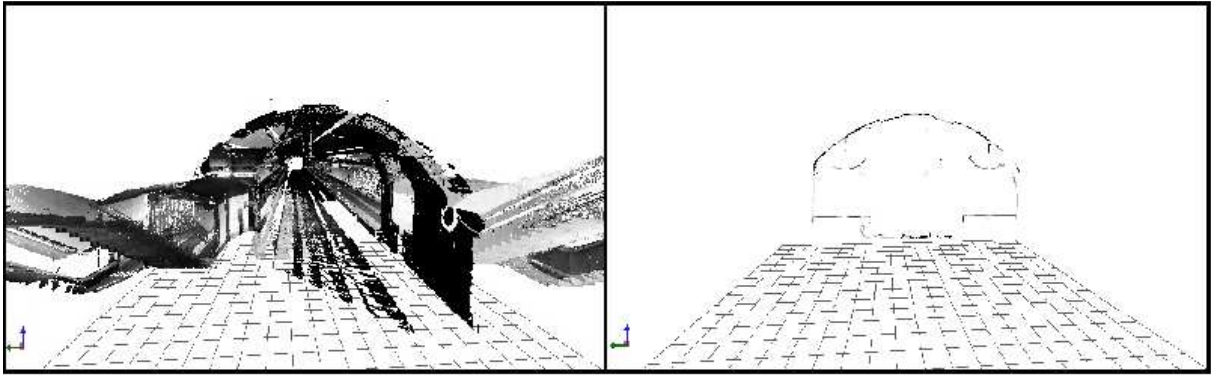


Imagen 5.2.2.2.3: Antes y después de aplicar la caja de selección.

5.2.2.3 Vistas de la nube de puntos

Para generar los perfiles se utilizan diferentes vistas que se encuentran en la parte superior de la pantalla.

Primero se asigna la vista “*Ortho*” y una vez hecho esto se escoge la vista deseada según el perfil que se tenga que extraer.

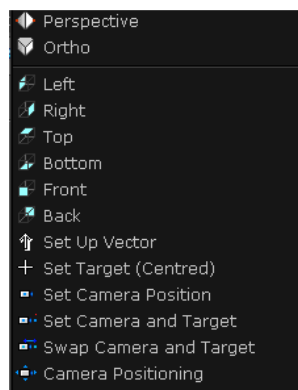


Imagen 5.2.2.3.1: Diferentes vistas de la nube de puntos

Se sitúa la posición de la cámara (*Camera Positioning*) con el mismo giro en el eje Z que tiene la caja de selección. Esto se realiza cada vez que se cambia el punto de vista.

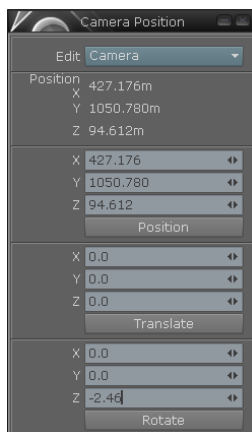


Imagen 5.2.2.3.1: Cuadro posición de la cámara.

En este proyecto se extraen perfiles transversales, perfiles longitudinales y planta.

5.2.2.4 Extracción de los perfiles realizados.

De cada sección que se realiza se extrae una imagen en formato digital para después vectorizar cada una de ellas en AutoCAD. Estas herramientas son las que aparecen en la imagen 5.2.2.4.1.



Imagen 5.2.2.4.1: Herramientas para extracción imágenes.

- El primer icono se utiliza para medir la distancia entre dos puntos de la nube.
- El segundo icono se utiliza para ver las coordenadas de un punto que seleccionemos.
- El tercer icono se utiliza para establecer los parámetros de la imagen a extraer.
- El cuarto icono se utiliza para hacer la captura de la imagen.

Para la extracción de las imágenes se utiliza el tercer icono en el que se define la escala de la imagen y el formato de la imagen extraída.

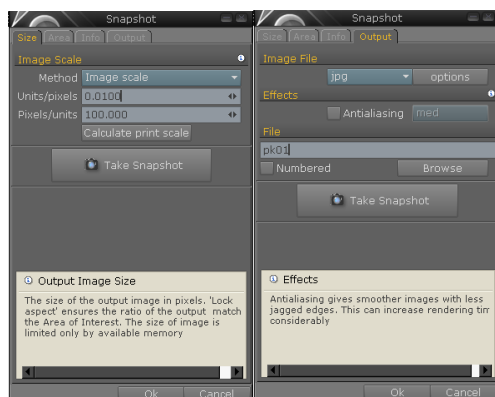


Imagen 5.2.2.4.2: Parámetros de la imagen extraída.

El último paso es digitalizar todas y cada una de las secciones con AutoCAD.

6 Resultados obtenidos

Como resultado de todos estos procesos que se explican en la memoria se obtiene el modelo tridimensional, perfiles y planta.

6.1 Perfiles transversales

En este proyecto se obtienen perfiles transversales cada 5 metros desde el PK 0+000 hasta el PK 0+120. Un total de 25 perfiles. Además se incluyen perfiles transversales en algunos puntos de especial interés para la correcta comprensión de la estación. En total se digitalizan un total de 28 perfiles de interés.

Se digitalizan un total de 53 perfiles transversales en este proyecto.

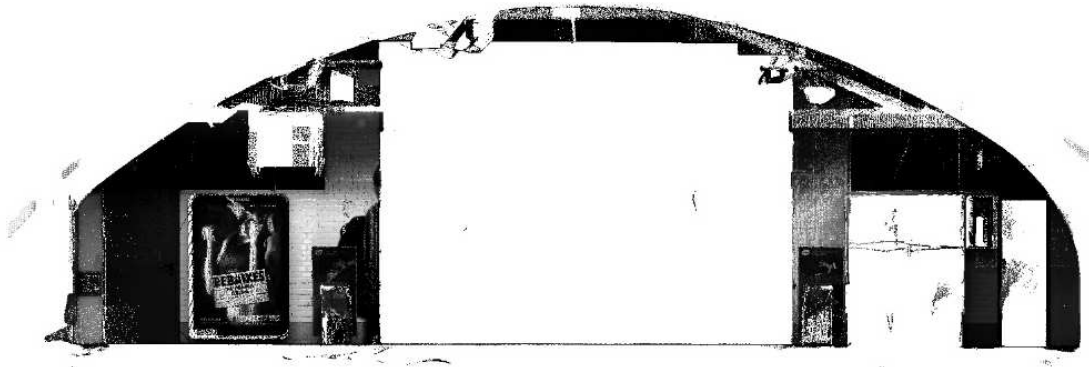


Imagen 6.1.1: Ejemplo de perfil transversal.

6.2 Perfiles longitudinales

En este proyecto se generan dos vistas del mismo perfil longitudinal, cada una muestra uno de los dos puntos de vista posibles.

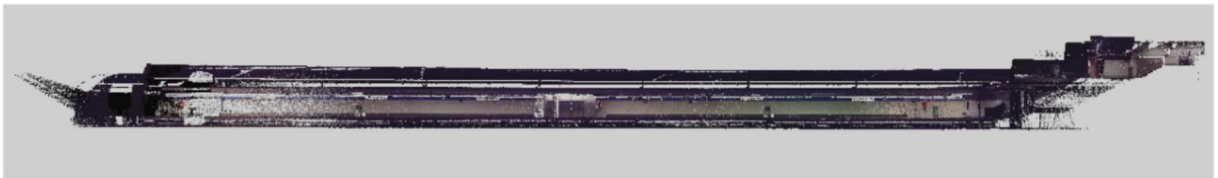


Imagen 6.2.1: Ejemplo perfil longitudinal cara A.

6.3 Planta

En este proyecto se obtiene la planta de andenes y las escaleras. La planta se realiza en dos imágenes: una de la zona de andén y otra de las escaleras. Se desarrolla de esta manera porque las escaleras no se representan correctamente en una sola imagen. Se digitaliza cada una y se unen para hacer una sola planta de andén y escaleras.

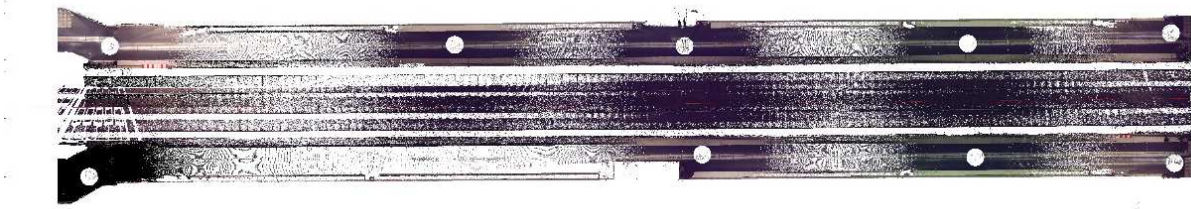


Imagen 6.3.1: Ejemplo planta zona de andén.

7 Conclusiones

La realización de este proyecto ha supuesto poder usar el sistema laser escáner como herramienta de trabajo para realizar el levantamiento topográfico de la estación.

Las ventajas de este sistema de trabajo son:

- Tener como resultado una nube de puntos densa y con un nivel de detalle muy alto.
- La reducción del tiempo en la toma de datos, en comparación con otras técnicas.
- La posibilidad de realizar secciones y plantas con mucha facilidad.
- La facilidad de uso del láser escáner.

Como desventajas de este sistema de trabajo:

- El ruido que se obtiene, si no es una zona despejada o hay elementos que puedan distorsionar la toma de datos.
- El problema de disponer de una nube de puntos tan densa, hace que el tiempo en gabinete aumente de manera considerable.
- La utilización de programas de pago para la manipulación de la nube de puntos.
- La necesidad de ordenadores muy potentes.

El resultado obtenido del proyecto ha sido muy satisfactorio, tanto por la experiencia obtenida en el uso del sistema del láser escáner, como por los conocimientos en el sistema del láser escáner y de sus programas.

En cuanto el modelo obtenido, es un modelo que incluye un gran detalle de los elementos de la estación. Puede ser utilizado para hacer un estudio de auscultación por la alta calidad que se obtiene en los puntos escaneados.

Para Transports Metropolitans de Barcelona los resultados obtenidos son satisfactorios; útiles para actualizar la información gráfica de la estación de Collblanc y especialmente porque le ha permitido valorar, con un caso real, la posibilidad de implantar esta nueva metodología de trabajo.

8 BIBLIOGRAFIA

Bannister, A. (2002). Técnicas modernas en topografía, México: Editorial Alfaomega.

Lerma García, J.L., Van Genechten, B., Heine, E., Santana Quintero, M. (2008). Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas, Valencia: UPV.

Li, Z., Chen, J., Baltsavias Emmanuel, P., International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2008). Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: ISPRS Congress Book, London: Taylor & Francis, CRC Press, 2008, 546 p.

Manual FARO Scene 5.2 <http://www.faro.com/es-es/productos/software-de-faro/scene/descargas>. Fecha de descarga Febrero 2014

Manual POINTTOOLS 1.6 <http://www.pointtools.com/userguide/>. Fecha de consulta: Marzo de 2014.

9 Información entregada en soporte digital

- Resumen, resumen.pdf
- Memoria, memoria.pdf
- Traducción tercera lengua, Tercera_lengua.pdf
- Carpeta Planos
- Carpeta Cálculos
- Video del recorrido del modelo tridimensional
- Nube de puntos en formato .pod
- Software Pointools View Pro 1.8(x64), para visualizar el modelo tridimensional.

10 Anejos

- Anejo 1: Especificaciones FARO
- Anejo 2: Ajuste por mínimos cuadrados
- Anejo 3: Anejo 3: Tabla T-student
- Anejo 4: Reseñas de las bases
- Anejo 5: Parte inglesa traducida al castellano

Anejo 1: Especificaciones FARO



Características del Focus^{3D}

-  **Pantalla táctil intuitiva**
Controle las funciones del escáner con la interfaz táctil que brinda facilidad de uso y control inigualables.
-  **Pequeño y compacto**
Con un tamaño de solo 9,5 x 8 x 4 pulgadas y un peso de 11 libras, el Focus^{3D} es el escáner 3D más pequeño jamás construido.
-  **Cámara color integrada**
Escaneos en color 3D fotorealísticos gracias a una cámara color integrada con superposición automática de color libre de paralaje de 70 megapíxeles.
-  **Batería de alto rendimiento**
La carga de la batería de ion-litio incorporada dura un máximo de cinco horas y puede cargarse durante el funcionamiento.
-  **Administración de datos**
Los datos se almacenan en la tarjeta SD que permite una transferencia sencilla y segura a la PC. Puede compartir las imágenes en Internet a través de SCENE WebShare.
-  **Compás**
En este modelo, se incluye un compás electrónico en la unidad para asociar datos direccionales con los escaneos y hacer que el proceso de registro automático sea más sencillo.
-  **Sensor de altura (altímetro)**
Los escaneos ahora incluyen información sobre la altura que puede utilizarse para analizar diversos niveles de pisos en un edificio. Los datos luego pueden utilizarse para diferenciar los pisos.
-  **Compensador de dos ejes**
Para disminuir al máximo la cantidad de objetivos necesarios, el compensador de dos ejes permite que cada escáner incluya información de nivel incorporada.
-  **WLAN (WiFi)**
El control remoto a través de la WLAN le permite iniciar, detener, visualizar y descargar escaneos a distancia.

Beneficios para el usuario final

- La portabilidad permite a los usuarios analizar objetos y entornos complejos.
- El registro automático del escaneo disminuye el tiempo previo al procesamiento.
- El gran ángulo de escaneo disminuye la cantidad de escaneo por proyecto.
- La interfaz táctil hace que cualquiera pueda utilizar el escáner con facilidad.

Beneficios para la empresa

- Brinda una inversión a largo plazo en proyectos futuros.
- Los usuarios dedicados pueden actuar como proveedores de escaneos generales dentro de la empresa.
- Los entornos reales se conservan en un mundo virtual 3D.
- La propuesta de valor y costo sin igual hace que cada proyecto de escaneo sea económico.

Especificaciones de rendimiento

Unidad de medición de distancia

Intervalo de univocidad: 153.49 m (503.58 pies).

Rango de Focus^{3D} 120¹: 0.6 m a 120 m en interior o exterior con poca luz ambiental e incidencia normal a una superficie reflectora del 90 %.

Rango de Focus^{3D} 20: 0.6 m a 20 m en una incidencia normal en una superficie reflectora mate mayor que el 10 %.

Velocidad de medición: 122,000/244,000/488,000/976,000 puntos/s.

Error de la medición de la distancia²: ± 2 mm a 10 m y 25 m, cada uno a un coeficiente de reflexión del 90 % y 10 %.

Error de medición ³	a 10 m	a 10 m, se reduce el error ⁴	a 25 m	a 25 m, se reduce el error ⁴
a 90 % de ref.	0.6 mm	0.3 mm	0.95 mm	0.5 mm
a 10 % de ref.	1.2 mm	0.6 mm	2.20 mm	1.1 mm

Unidad de color

Resolución: Color de hasta 70 megapíxeles.

Característica dinámica de color: Ajuste automático del brillo.

Unidad defleectora

Campo visual vertical (vertical/horizontal): 305°/360°.

Tamaño de los pasos (vertical/horizontal): 0.005° (40,960 píxeles 3D en 360°)/0.005° (40,960 píxeles 3D en 360°).

Velocidad máx. de escaneo vertical: 5,820 rpm o 97 Hz.

Láser (emisor óptico)

Potencia del láser (cw Ø): 20 mW (láser de clase 3R).

Longitud de onda: 905 nm.

Divergencia del haz: Típica de 0.16 mrad (0.009°).

Diámetro del haz al salir: 3.6 mm, circular.

Control y tratamiento de datos

Almacenamiento de datos: SD, SDHC™, SDXC™; tarjeta de 32 GB incluida.

Control del escáner: A través de una pantalla táctil.

Nuevo acceso WiFi (WLAN): Control remoto; se puede visualizar el escaneo y la descarga en dispositivos móviles con Flash®.

Sensor múltiple

Compensador de dos ejes: Cada nivel analiza con una precisión de 0.015° y un rango de $\pm 5^\circ$.

Sensor de altura: Detecta la altura en relación a un punto fijo a través de un barómetro electrónico y la agrega al escaneo.

Compás: El compás electrónico le brinda orientación al escaneo. Se incluye una función de calibración.

1) Depende de la luz ambiental, que puede ser una fuente de error; la luz ambiental brillante, por ejemplo, la luz del sol puede disminuir el rango real del escaneo a distancias mayores. En condiciones de poca luz ambiental, el rango puede ser mayor o 100 m para la incidencia normal en superficies altamente reflectoras.
2) El error de medición de distancia se define como el error máximo en la distancia que mide el escáner desde el punto de origen hasta un punto en un objetivo plano.
3) El error de medición se define como una desviación estándar de los datos que el escáner produce.
4) Se puede activar un algoritmo de reducción de error a puntos procesados en conjuntos de 4 o 16 y así reducir el error de los datos procesados por un factor de 3 o 4, sujeto a control de calidad previo.

Patentado: EE.UU. 7,430,068 B2; 7,733,544; 7,847,922 B2

Especificaciones de hardware

Tensión de la fuente de alimentación: 19 V (suministro externo), 14.4 V (batería interna).

Consumo de energía: 40 W y 80 W, respectivamente (mientras se carga la batería).

Duración de la batería: Hasta 5 horas.

Temperatura ambiente: 5 °C a 40 °C.

Humedad: Sin condensado.

Conexión de cable: Ubicada en el cuerpo del escáner.

Peso: 5.0 kg.

Tamaño: 240 x 200 x 100 mm³

Calibración de mantenimiento: Anual.

Libre de paralaje: Sí.

SFDC_DAM03_0190.pdf Revisado: 4/14/12

Definición de las componentes del sistema matricial del ajuste planimétrico de la poligonal cerrada.

- [illegible]

- **Vector de términos independientes (u):** tiene una dimensión de 29 filas por 1 columna, se obtiene a partir de las diferencias entre ángulos observados y los calculados, y de la diferencia de distancias también observadas y calculadas. Las unidades de la diferencia de ángulos son segundos centesimales y de metros para la distancia.

	Vector u
BR72-BR7-BR6	0
BR7-BR6-BR5	0
BR6-BR5-BR4	0
BR5-BR4-BR22	0
BR4-BR22-BR111	0
BR22-BR111-BR1	0
BR111-BR1-BR14	0
BR1-BR14-BR13	0
BR14-BR13-BR12	0
BR13-BR12-BR11	0
BR12-BR11-BR10	0
BR11-BR10-BR9	0
BR10-BR9-BR8	0
BR9-BR8-BR7	-204,5204
BR8-BR7-BR72	81,2287
BR7 - BR6	0
BR6 - BR5	0
BR5 - BR4	0
BR4 - BR22	0
BR22 - RBR111	0
BR111 - BR1	0
BR1 - BR14	0
BR14 - BR13	0
BR13 - BR12	0
BR12 - BR11	0
BR11 - BR10	0
BR10 - BR9	0
BR9 - BR8	0
BR8 - BR7	-0,006

- **Matriz de pesos (P):** Tiene una dimensión de 29 filas por 29 columnas. Es la matriz que pondera las observaciones, e intervienen los errores cometidos en la medida de los ángulos y de las distancias.

-En las observaciones angulares el peso es $P(a) = \frac{1}{\left(\sqrt{\left(e_{a \ i}^{i+1}\right)^2 + \left(e_{a \ i}^{i-1}\right)^2}\right)^2}$ en segundos centesimales.

-En las observaciones de distancia el peso es $P(d) = \frac{1}{\left(\frac{e_d}{\sqrt{2}}\right)^2}$ en metros.

67

- **Vector de correcciones (x):** es el vector resultado que se compone de las correcciones a las coordenadas. Las coordenadas finales serán el resultado de sumarle la corrección a las coordenadas aproximadas.

	x	
dx6	0,001	m
dy6	0,000	m
dx5	0,001	m
dy5	0,000	m
dx4	0,002	m
dy4	0,000	m
dx22	0,002	m
dy22	0,000	m
dx111	0,002	m
dy111	0,001	m
dx1	0,003	m
dy1	0,001	m
dx14	0,003	m
dy14	-0,003	m
dx13	0,003	m
dy13	-0,005	m
dx12	0,003	m
dy12	-0,006	m
dx11	0,004	m
dy11	-0,006	m
dx10	0,004	m
dy10	-0,008	m
dx9	0,005	m
dy9	-0,009	m
dx8	0,005	m
dy8	-0,012	m

- **Vector de residuos (R):** Es el vector que da correcciones a los observables. Los valores de los residuos están expresados en segundos centesimales y en metros.

$$R=A.x-u$$

R
-2,1936
0,0601
0,6492
0,6257
-20,6707
-0,7499
0,5619
1,2632
-0,0125
8,4342
106,1567
28,5741
-0,0202
0,6435
-0,0301
0,0010
0,0003
0,0003
0,0000
0,0009
0,0002
-0,0003
-0,0003
-0,0003
-0,0006
0,0003
0,0002
0,0003
0,0003

• Matriz de varianza-covarianza:

-Matriz cofactor: $Q_u = N^{-1} = (A^T P A)^{-1}$

MATRIZ COFACTOR															
	dx6	dy6	dx5	dy5	dx4	dy4	dx22	dy22	dx11	dy11	dx1	dy1	dx8	dy8	
dx6	5.41413E-06	2.63558E-07	5.36366E-06	7.45425E-07	5.03156E-06	1.98098E-06	4.6624E-06	1.99107E-06	3.6173E-06	1.68257E-06	1.97772E-06	3.67427E-06	1.74401E-06	2.38618E-05	
dy6	2.63558E-07	7.64791E-06	2.08459E-06	1.03387E-05	2.42282E-06	2.06617E-05	-5.395E-07	2.0449E-05	-9.75717E-07	2.2023E-05	1.74401E-06	6.0885E-06	4.8584E-06	6.79834E-06	
dx5	5.36366E-06	2.08459E-06	7.10996E-06	6.77418E-06	6.60541E-06	6.20541E-06	5.6508E-06	6.17034E-06	4.2805E-06	6.0885E-06	6.0885E-06	6.0885E-06	6.0885E-06	6.0885E-06	
dy5	7.45425E-07	1.03387E-05	2.35099E-06	1.46661E-05	2.8569E-06	2.89234E-05	-1.233E-06	2.86198E-05	-1.74135E-06	3.08717E-05	2.08195E-06	6.03107E-06	3.34291E-06	3.34291E-06	
dx4	5.03156E-06	2.42282E-06	6.77418E-06	2.8569E-06	8.36488E-06	7.13326E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	6.03107E-06	6.03107E-06	6.03107E-06	6.03107E-06	
dy4	1.98089E-06	2.06617E-05	6.20541E-06	2.89234E-05	7.13326E-06	5.91269E-05	-1.533E-06	5.8947E-05	-2.78626E-06	6.30266E-05	5.0141E-06	5.0141E-06	6.83052E-05	6.83052E-05	
dx22	4.6624E-06	-5.39532E-07	5.65079E-06	2.12324E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	7.09923E-06	5.21264E-06	5.21264E-06	-2.44944E-06	-2.44944E-06	
dy22	1.99107E-06	2.0449E-05	6.17034E-06	2.86198E-05	6.17034E-06	6.17034E-06	6.17034E-06	6.17034E-06	6.17034E-06	6.17034E-06	6.4497E-05	6.4497E-05	6.96698E-05	6.96698E-05	
dx11	3.6173E-06	-9.75717E-07	4.2805E-06	-1.74135E-06	5.39637E-06	-2.78626E-06	5.7504E-06	-2.90465E-06	8.99538E-06	-1.9565E-06	8.15203E-06	8.15203E-06	-1.97821E-06	-1.97821E-06	
dy11	1.68257E-06	2.2023E-05	6.08854E-06	3.08717E-05	6.94313E-06	6.30266E-05	-2.477E-06	6.4497E-05	-1.9565E-06	7.08198E-05	7.18804E-06	7.18804E-06	7.72144E-06	7.72144E-06	
dx1	3.67427E-06	1.74401E-06	4.85843E-06	2.08195E-06	6.03107E-06	5.0141E-06	5.21264E-06	5.0523E-06	8.15203E-06	7.18804E-06	7.80347E-06	7.80347E-06	8.62024E-05	8.62024E-05	
dx14	1.97727E-06	2.38618E-05	6.79834E-06	3.34291E-05	7.77092E-06	6.83052E-05	-2.449E-06	6.96698E-05	-1.97821E-06	7.72144E-06	7.80347E-06	7.80347E-06	8.62024E-05	8.62024E-05	
dy14	3.25897E-06	1.20776E-06	4.24574E-06	1.36927E-06	5.28101E-06	3.47437E-06	4.7014E-06	3.8921E-06	7.35801E-06	5.22806E-06	8.61316E-06	8.61316E-06	5.56369E-06	5.56369E-06	
dx13	8.02875E-07	7.84038E-06	2.36807E-06	2.74293E-06	2.74293E-06	2.23637E-05	-5.634E-07	2.30013E-05	8.20618E-07	2.33517E-05	-1.82272E-07	-1.82272E-07	2.35582E-05	2.35582E-05	
dy13	2.72983E-06	-7.75581E-07	3.22432E-06	-1.36984E-06	4.06567E-06	-2.21345E-06	4.3485E-06	-2.30788E-06	6.778E-06	-1.56173E-06	6.68412E-06	6.68412E-06	-2.2482E-06	-2.2482E-06	
dx12	2.20373E-07	4.21661E-07	2.75048E-07	2.7722E-06	3.6022E-07	1.09949E-06	2.4999E-07	1.29428E-06	1.89984E-06	-1.36995E-06	5.74456E-06	5.74456E-06	-4.91827E-06	-4.91827E-06	
dy12	2.36227E-06	-7.39148E-07	2.7722E-06	-1.28102E-06	3.50435E-06	-2.11084E-06	3.7787E-06	-2.19585E-06	5.89562E-06	-1.50032E-06	5.74456E-06	5.74456E-06	-2.381E-06	-2.381E-06	
dx11	5.79281E-08	-1.44839E-06	-2.71678E-07	-2.01785E-06	-2.64423E-07	-4.2605E-06	4.3115E-07	-4.17735E-06	2.13198E-06	-7.6024E-06	-4.52494E-06	-4.52494E-06	-1.20891E-05	-1.20891E-05	
dy11	1.32019E-06	-7.9972E-08	1.61996E-06	-2.49065E-07	2.03033E-06	-2.15951E-07	2.0345E-06	-2.57325E-07	3.05956E-06	4.45302E-07	3.65173E-06	3.65173E-06	5.6206E-07	5.6206E-07	
dx10	-2.11219E-08	-1.6826E-06	-4.08923E-07	-2.34104E-06	-4.30262E-07	-4.92656E-06	3.6366E-07	-4.8649E-06	1.94702E-06	-8.26581E-06	-4.5764E-06	-4.5764E-06	-1.26814E-05	-1.26814E-05	
dy10	9.32885E-07	5.14805E-08	1.16893E-06	-2.54762E-08	1.4599E-06	1.63079E-07	1.4122E-06	1.30717E-07	2.04089E-06	8.31297E-07	2.85051E-06	2.85051E-06	1.17974E-06	1.17974E-06	
dx9	7.17172E-07	-8.50287E-07	-4.59457E-07	-1.16088E-06	-5.3219E-07	-2.49793E-06	-1.221E-07	-2.4513E-06	6.09363E-07	6.09363E-07	-3.11646E-06	-3.11646E-06	-4.6173E-07	-4.6173E-07	
dy9	-3.00988E-07	-6.47091E-07	-5.2348E-07	-8.68721E-07	-6.22482E-07	-1.90283E-06	-3.069E-07	-1.86279E-06	1.47782E-07	-3.47113E-06	-2.77845E-06	-2.77845E-06	-5.38178E-06	-5.38178E-06	
dx8	3.68816E-07	-5.25404E-08	4.45523E-07	-1.11572E-07	5.59924E-07	-1.48994E-07	5.7549E-07	-1.59067E-07	8.93941E-07	-3.01156E-08	9.2947E-07	9.2947E-07	-8.50822E-08	-8.50822E-08	
dy8	-2.62784E-08	-1.1895E-07	-6.12565E-08	-1.62318E-07	-7.02653E-08	-3.509E-07	-1.192E-08	-3.42089E-07	1.14169E-07	-6.60535E-07	-4.87391E-07	-4.87391E-07	-1.05836E-06	-1.05836E-06	
dx14	dx15	dx16	dx17	dx18	dx19	dx20	dx21	dx22	dx23	dx24	dx25	dx26	dx27	dx28	dx29
3.25897E-06	8.02875E-07	2.72983E-06	2.20373E-07	2.36227E-06	5.79281E-08	1.32019E-06	-2.11219E-08	9.32885E-07	-2.11376E-07	7.17172E-07	-3.00988E-07	3.68816E-07	-2.62784E-08	3.68816E-07	-2.62784E-08
1.20776E-06	7.84038E-06	-7.75581E-07	4.21661E-07	-7.39148E-07	-1.44839E-06	-7.9972E-08	-1.6826E-06	-4.08923E-07	-2.34104E-06	-4.92656E-06	5.14805E-08	-8.50287E-07	-5.25404E-08	-8.50287E-07	-5.25404E-08
4.24574E-06	2.36807E-06	3.22432E-06	2.75048E-07	2.7722E-06	-2.71678E-07	1.61996E-06	-4.08923E-07	1.61996E-06	-4.08923E-07	1.61996E-06	-4.59457E-07	8.5887E-07	4.45523E-07	4.59457E-07	4.59457E-07
1.36927E-06	1.09888E-05	-1.36984E-06	5.99469E-07	-1.28102E-06	-2.01785E-06	-2.49793E-06	-2.54762E-08	-2.49793E-06	-2.54762E-08	-2.49793E-06	-1.16088E-06	-5.3219E-07	-4.59457E-07	-1.16088E-06	-5.3219E-07
5.28101E-06	2.74293E-06	4.06567E-06	3.6022E-07	3.50435E-06	-2.64423E-07	2.03033E-06	2.03033E-06	2.03033E-06	2.03033E-06	2.03033E-06	-2.49793E-06	-1.221E-07	-2.4513E-06	-2.49793E-06	-1.221E-07
3.47437E-06	2.23637E-05	-2.21345E-06	1.09949E-06	-2.11084E-06	-4.2605E-06	-2.15951E-07	-2.54762E-08	-2.15951E-07	-2.54762E-08	-2.15951E-07	-4.92656E-06	1.63079E-07	1.4122E-06	-4.92656E-06	1.63079E-07
3.48921E-06	2.30013E-05	-2.30788E-06	1.29428E-06	-2.19585E-06	-4.17735E-06	-2.57325E-07	-4.8649E-06	-4.17735E-06	-2.57325E-07	-4.8649E-06	1.30717E-07	2.04081E-07	1.86279E-06	1.47782E-07	1.4169E-07
7.35801E-06	8.20618E-07	6.778E-06	1.89984E-06	5.89562E-06	2.13198E-06	3.05956E-06	1.94702E-06	2.04089E-06	6.09363E-07	6.09363E-07	1.77725E-06	1.77725E-06	1.77725E-06	6.778E-06	1.77725E-06
5.22806E-06	2.33517E-05	-1.56173E-06	-1.36995E-06	-1.59032E-06	-7.6024E-06	4.45302E-07	-8.26581E-06	8.31297E-07	-4.44746E-06	-4.44746E-06	-2.19515E-07	-3.47113E-06	-3.01156E-08	-4.44746E-06	-2.19515E-07
8.61316E-06	-1.82272E-07	6.68412E-06	-3.62509E-06	5.74456E-06	-4.52494E-06	3.65173E-06	-4.5764E-06	2.85051E-06	3.11646E-06	3.11646E-06	1.71913E-06	1.71913E-06	2.77845E-06	9.2947E-07	-4.87391E-07
5.56369E-06	2.35582E-05	-2.2482E-06	-4.91827E-06	-2.2381E-06	-1.20891E-05	5.6206E-07	-1.26814E-05	1.17974E-06	-6.91673E-06	-6.91673E-06	-4.12573E-07	-5.38178E-06	-8.50822E-08	-4.12573E-07	-5.38178E-06
9.40114E-06	4.01523E-08	7.65893E-06	-2.34509E-06	6.60589E-06	-2.98539E-06	3.97218E-06	-3.08509E-06	2.98585E-06	-2.33622E-06	-2.33622E-06	1.98023E-06	1.98023E-06	1.04872E-06	1.04872E-06	-3.59386E-07
4.01523E-08	2.83327E-05	3.9055E-07	2.82214E-05	4.78974E-07	2.81425E-05	-2.04687E-06	2.67496E-05	-3.03078E-06	1.544E-05	1.544E-05	4.65255E-07	4.65255E-07	-2.919E-08	4.65255E-07	-2.919E-08
7.65893E-06	3.9055E-07	8.92009E-06	1.82887E-06	7.76824E-06	2.27032E-06	4.0606E-06	-2.07602E-06	2.73823E-06	5.15394E-07	5.15394E-07	2.32822E-06	2.32822E-06	1.17584E-06	1.17584E-06	1.01234E-07
-2.34509E-06	2.82214E-05	1.82887E-06	4.34766E-05	1.94372E-06	4.72088E-05	-3.23572E-06	4.55098E-06	-4.99895E-06	4.55098E-06	4.55098E-06	9.09573E-07	9.09573E-07	1.11245E-08	4.26077E-06	4.26077E-06
6.60589E-06	4.78974E-07	7.76824E-06	1.94372E-06	8.5204E-06	2.37414E-06	4.46781E-06	2.37414E-06	2.37414E-06	2.37414E-06	2.37414E-06	3.02039E-06	3.02039E-06	2.55454E-08	1.29132E-06	1.00549E-07
-2.98539E-06	2.81425E-05	2.27032E-06	4.72088E-05	2.37414E-06	5.20472E-05	-3.23572E-06	4.55098E-06	-4.99895E-06	4.55098E-06	4.55098E-06	2.87435E-05	2.87435E-05	2.62466E-08	4.69326E-06	4.69326E-06
3.97218E-06	-2.04687E-06	4.0606E-06	-3.23572E-06	4.46781E-06	5.20472E-05	5.95161E-06	-3.661								

-Matriz varianza-covarianza: $\sigma_{Qu} = \sigma^2 Q_u$

$Q = \sigma^2 Q^T W^{-1}$	σ_{x6}	σ_{y6}	σ_{x5}	σ_{y5}	σ_{x4}	σ_{y4}	σ_{x22}	σ_{y22}	σ_{x111}	σ_{y111}	σ_{x1}	σ_{y1}	σ_{x14}	σ_{y14}
σ_{x6}	0,0000018	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000016	0,0000006	0,0000015	0,0000006	0,0000012	0,0000005	0,0000012	0,0000006	0,0000011	0,0000003
σ_{y6}	0,0000001	0,0000025	0,0000007	0,0000007	0,0000008	0,0000067	-0,0000005	0,0000066	-0,0000003	0,0000071	0,0000006	0,0000077	0,0000004	0,0000025
σ_{x5}	0,0000017	0,0000007	0,0000023	0,0000008	0,0000022	0,0000020	0,0000018	0,0000020	0,0000014	0,0000020	0,0000016	0,0000022	0,0000014	0,0000008
σ_{y5}	0,0000002	0,0000033	0,0000008	0,0000009	0,0000009	0,0000094	-0,0000004	0,0000093	-0,0000006	0,0000100	0,0000007	0,0000108	0,0000004	0,0000036
σ_{x4}	0,0000016	0,0000008	0,0000022	0,0000009	0,0000027	0,0000023	0,0000023	0,0000023	0,0000017	0,0000022	0,0000020	0,0000025	0,0000017	0,0000009
σ_{y4}	0,0000006	0,0000067	0,0000020	0,0000006	0,0000023	0,0000091	-0,0000005	0,0000089	-0,0000009	0,0000024	0,0000016	0,0000021	0,0000011	0,0000072
σ_{x22}	0,0000015	-0,0000002	0,0000018	-0,0000004	0,0000023	-0,0000021	-0,0000008	-0,0000005	0,0000019	-0,0000008	0,0000017	-0,0000008	0,0000015	-0,0000002
σ_{y22}	0,0000006	0,0000066	0,0000020	0,0000009	0,0000023	0,0000089	-0,0000005	0,0000094	-0,0000009	0,0000029	0,0000016	0,0000026	0,0000011	0,0000074
σ_{x111}	0,0000012	-0,0000003	0,0000014	-0,0000006	0,0000017	-0,0000009	0,0000019	-0,0000009	0,0000029	-0,0000006	0,0000026	-0,0000006	0,0000024	0,0000003
σ_{y111}	0,0000005	0,0000071	0,0000020	0,0000010	0,0000022	-0,0000004	-0,0000008	0,0000029	-0,0000006	0,0000029	0,0000025	0,0000050	0,0000017	0,0000076
σ_{x1}	0,0000012	0,0000006	0,0000016	0,0000007	0,0000020	0,0000016	0,0000017	0,0000016	0,0000026	0,0000023	0,0000025	0,0000025	0,0000028	-0,0000001
σ_{y1}	0,0000006	0,0000077	0,0000022	0,0000010	0,0000025	0,0000021	-0,0000008	0,0000026	-0,0000006	0,00000250	0,0000025	0,0000029	0,0000018	0,0000076
σ_{x14}	0,0000011	0,0000004	0,0000014	0,0000004	0,0000017	0,0000011	0,0000015	0,0000011	0,0000024	0,0000017	0,0000028	0,0000018	0,0000030	0,0000000
σ_{y14}	0,0000003	0,0000025	0,0000008	0,0000008	0,0000036	0,0000009	0,0000072	0,0000002	0,0000003	0,0000076	-0,0000001	0,0000076	0,0000000	0,0000092
σ_{x13}	0,0000009	-0,0000003	0,0000010	-0,0000004	0,0000013	-0,0000007	0,0000014	-0,0000007	0,0000022	-0,0000005	0,0000022	-0,0000007	0,0000025	0,0000001
σ_{y13}	0,0000001	0,0000001	0,0000002	0,0000001	0,0000004	0,0000004	0,0000001	0,0000004	0,0000006	-0,0000004	-0,0000012	-0,0000016	-0,0000008	0,0000091
σ_{x12}	0,0000008	-0,0000002	0,0000009	-0,0000004	0,0000011	-0,0000007	0,0000012	-0,0000007	0,0000019	-0,0000005	0,0000019	-0,0000007	0,0000021	0,0000002
σ_{y12}	0,0000000	-0,0000005	-0,0000001	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000014	0,0000001	-0,0000014	0,0000017	-0,0000025	-0,0000015	-0,0000039	-0,0000010	0,0000091
σ_{x11}	0,0000004	0,0000000	0,0000005	-0,0000001	0,0000007	-0,0000001	0,0000007	-0,0000001	0,0000010	0,0000001	0,0000012	0,0000002	0,0000013	-0,0000007
σ_{y11}	0,0000000	-0,0000005	-0,0000001	-0,0000008	-0,0000001	-0,0000016	0,0000001	-0,0000016	0,0000006	-0,0000027	-0,0000015	-0,0000041	-0,0000010	0,0000087
σ_{x10}	0,0000003	0,0000000	0,0000004	0,0000000	0,0000005	0,0000001	0,0000005	0,0000000	0,0000007	0,0000003	0,0000009	0,0000004	0,0000010	-0,0000010
σ_{y10}	-0,0000001	-0,0000003	-0,0000001	-0,0000004	-0,0000002	-0,0000008	0,0000000	-0,0000008	0,0000002	-0,0000014	-0,0000010	-0,0000022	-0,0000008	0,0000050
σ_{x9}	0,0000002	0,0000000	0,0000003	-0,0000001	0,0000003	-0,0000001	0,0000004	-0,0000001	0,0000006	-0,0000001	0,0000006	-0,0000001	0,0000006	0,0000002
σ_{y9}	-0,0000001	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000002	-0,0000002	-0,0000006	-0,0000001	-0,0000006	0,0000000	-0,0000011	-0,0000009	-0,0000017	-0,0000007	0,0000039
σ_{x8}	0,0000001	0,0000000	0,0000001	0,0000000	0,0000002	0,0000000	0,0000002	-0,0000001	0,0000003	0,0000000	0,0000003	0,0000000	0,0000003	0,0000000
σ_{y8}	0,0000000	0,0000000	-0,0000001	-0,0000000	0,0000000	-0,0000001	0,0000000	-0,0000001	0,0000000	-0,0000002	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000001	0,0000008
σ_{x13}	0,0000009	0,0000001	0,0000008	0,0000000	0,0000000	0,0000004	0,0000000	0,0000003	-0,0000001	0,0000002	-0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000000
σ_{y13}	-0,0000003	0,0000001	-0,0000002	-0,0000005	0,0000005	-0,0000005	-0,0000005	0,0000000	-0,0000003	0,0000000	-0,0000003	0,0000000	0,0000000	0,0000000
σ_{x10}	0,0000010	0,0000001	0,0000009	-0,0000001	0,0000001	0,0000005	-0,0000001	0,0000004	-0,0000001	0,0000003	0,0000003	0,0000001	0,0000001	0,0000000
σ_{y10}	-0,0000004	0,0000002	-0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000008	0,0000000	-0,0000004	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000002	0,0000000	-0,0000001
σ_{x11}	0,0000013	0,0000001	0,0000011	-0,0000001	0,0000007	-0,0000001	0,0000001	0,0000005	0,0000005	0,0000003	0,0000003	0,0000002	0,0000002	0,0000000
σ_{y11}	-0,0000007	0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000014	0,0000001	-0,0000016	0,0000001	-0,0000008	-0,0000001	-0,0000001	0,0000006	0,0000000	-0,0000001
σ_{x12}	0,0000007	0,0000004	0,0000007	0,0000001	0,0000007	0,0000007	0,0000001	0,0000000	0,0000000	0,0000004	-0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000000
σ_{y12}	-0,0000007	0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000014	-0,0000001	-0,0000016	0,0000001	-0,0000008	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000006	-0,0000001	-0,0000001
σ_{x14}	0,0000002	0,0000004	0,0000007	0,0000001	0,0000007	0,0000007	0,0000001	0,0000000	0,0000000	0,0000002	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
σ_{y14}	-0,0000005	-0,0000004	-0,0000005	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000006	-0,0000001	-0,0000006	0,0000000	-0,0000011	-0,0000009	-0,0000017	-0,0000007	0,0000039
σ_{x8}	0,0000001	0,0000000	0,0000001	0,0000000	0,0000002	0,0000000	0,0000002	-0,0000001	0,0000003	0,0000000	0,0000003	0,0000000	0,0000003	0,0000000
σ_{y8}	0,0000000	0,0000000	-0,0000001	-0,0000000	0,0000000	-0,0000001	0,0000000	-0,0000001	0,0000000	-0,0000002	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000001	0,0000008
σ_{x13}	0,0000009	0,0000001	0,0000008	0,0000000	0,0000000	0,0000004	0,0000000	0,0000003	-0,0000001	0,0000002	-0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000000
σ_{y13}	-0,0000003	0,0000001	-0,0000002	-0,0000005	0,0000005	-0,0000005	-0,0000005	0,0000000	-0,0000003	0,0000000	-0,0000003	0,0000000	0,0000000	0,0000000
σ_{x10}	0,0000010	0,0000001	0,0000009	-0,0000001	0,0000001	0,0000005	-0,0000001	0,0000004	-0,0000001	0,0000003	0,0000003	0,0000001	0,0000001	0,0000000
σ_{y10}	-0,0000004	0,0000002	-0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000008	0,0000000	-0,0000004	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000002	0,0000000	-0,0000001
σ_{x11}	0,0000013	0,0000001	0,0000011	-0,0000001	0,0000007	-0,0000001	0,0000001	0,0000005	0,0000005	0,0000003	0,0000003	0,0000002	0,0000002	0,0000000
σ_{y11}	-0,0000007	0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000014	0,0000001	-0,0000016	0,0000001	-0,0000008	-0,0000001	-0,0000001	0,0000006	0,0000000	-0,0000001
σ_{x12}	0,0000007	0,0000004	0,0000007	0,0000001	0,0000007	0,0000007	0,0000001	0,0000000	0,0000000	0,0000004	-0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000000
σ_{y12}	-0,0000007	0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000014	-0,0000001	-0,0000016	0,0000001	-0,0000008	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000006	-0,0000001	-0,0000001
σ_{x14}	0,0000002	0,0000004	0,0000007	0,0000001	0,0000007	0,0000007	0,0000001	0,0000000	0,0000000	0,0000002	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
σ_{y14}	-0,0000005	-0,0000004	-0,0000005	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000006	-0,0000001	-0,0000006	0,0000000	-0,0000011	-0,0000009	-0,0000017	-0,0000007	0,0000039
σ_{x8}	0,0000001	0,0000000	0,0000001	0,0000000	0,0000002	0,0000000	0,0000002	-0,0000001	0,0000003	0,0000000	0,0000003	0,0000000	0,0000003	0,0000000
σ_{y8}	0,0000000	0,0000000	-0,0000001	-0,0000000	0,0000000	-0,0000001	0,0000000	-0,0000001	0,0000000	-0,0000002	-0,0000002	-0,0000003	-0,0000001	0,0000008
σ_{x13}	0,0000009	0,0000001	0,0000008	0,0000000	0,0000000	0,0000004	0,0000000	0,0000003	-0,0000001	0,0000002	-0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000000
σ_{y13}	-0,0000003	0,0000001	-0,0000002	-0,0000005	0,0000005	-0,0000005	-0,0000005	0,0000000	-0,0000003	0,0000000	-0,0000003	0,0000000	0,0000000	0,0000000
σ_{x10}	0,0000010	0,0000001	0,0000009	-0,0000001	0,0000001	0,0000005	-0,0000001	0,0000004	-0,0000001	0,0000003	0,0000003	0,0000001	0,0000001	0,0000000
σ_{y10}	-0,0000004	0,0000002	-0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000008	0,0000000	-0,0000004	-0,0000001	-0,0000001	-0,0000002	0,0000000	-0,0000001
σ_{x11}	0,0000013	0,0000001	0,0000011	-0,0000001	0,0000007	-0,0000001	0,0000001	0,0000005	0,0000005	0,0000003	0,0000003	0,0000002	0,0000002	0,0000000
σ_{y11}	-0,0000007	0,0000004	-0,0000007	-0,0000001	-0,0000014	0,0000001	-0,0000016	0,0000001	-0,0000008	-0,0000001	-0,0000001	0,0000006	0,000	

A partir de esta matriz se obtienen los errores asociados a cada incógnita del sistema:

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{\sigma^2 Q_{u_i}}$$

Errores asociados con 68% de fiabilidad					
σ_{x6}	0,001	m	σ_{y6}	0,002	m
σ_{x5}	0,002	m	σ_{y5}	0,002	m
σ_{x4}	0,002	m	σ_{y4}	0,004	m
σ_{x22}	0,002	m	σ_{y22}	0,004	m
σ_{x111}	0,002	m	σ_{y111}	0,005	m
σ_{x1}	0,002	m	σ_{y1}	0,005	m
σ_{x14}	0,002	m	σ_{y14}	0,003	m
σ_{x13}	0,002	m	σ_{y13}	0,004	m
σ_{x12}	0,002	m	σ_{y12}	0,004	m
σ_{x11}	0,001	m	σ_{y11}	0,004	m
σ_{x10}	0,001	m	σ_{y10}	0,003	m
σ_{x9}	0,001	m	σ_{y9}	0,002	m
σ_{x8}	0,001	m	σ_{y8}	0,001	m

- Estimador desviación tipo del peso unidad (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{R^T P R}{gll}}$$

$\sigma_0^2 =$	0,323617847
$\sigma_0 =$	0,568874193

Definición de las componentes del sistema matricial del ajuste planimétrico de la poligonal encuadrada.

- **Matriz de diseño (A):** tiene una dimensión de 7 filas por 4 columnas. Hay 4 ecuaciones angulares, 3 ecuaciones de distancia y 4 incógnitas que son las correcciones en coordenadas.

Matriz A	dx3	dy3	dx2	dy2
BR5-BR4-BR3	3125,647782	-39452,77001	0	0
BR4-BR3-BR2	64930,84036	33038,28028	-68056,48815	6414,489723
BR3-BR2-BR1	-68056,48815	6414,489723	75707,84321	59486,66552
BR2-BR1-BR14	0	0	-7651,355067	-65901,15524
BR4 - BR3	0,996876392	0,078977585	0	0
BR3 - BR2	0,093836557	0,995587616	-0,093836557	-0,995587616
BR2 - BR1	0	0	-0,994461018	0,115460409

- **Vector de términos independientes (u):** tiene una dimensión de 7 filas por 1 columna, se obtiene a partir de las diferencias entre ángulos observados y los calculados, y de la diferencia de distancias también observadas y calculadas. Las unidades de la diferencia de ángulos son segundos centesimales y de metros para la distancia.

	Vector u
BR5-BR4-BR3	0
BR4-BR3-BR2	0
BR3-BR2-BR1	-850,4350
BR2-BR1-BR14	-697,1681
BR4 - BR3	0
BR3 - BR2	0
BR2 - BR1	-0,0110

- **Matriz de pesos (P):** Tiene una dimensión de 7 filas por 29 columnas. Es la matriz que pondera las observaciones, e intervienen los errores cometidos en la medida de los ángulos y de las distancias.

-En las observaciones angulares el peso es $P(a) = \frac{1}{\left(\sqrt{(e_{a \ i}^{i+1})^2 + (e_{a \ i}^{i-1})^2}\right)^2}$ en segundos

centesimales.

-En las observaciones de distancia el peso es $P(d) = \frac{1}{\left(\frac{e_d}{\sqrt{2}}\right)^2}$ en metros.

Matriz P							
BR5-BR4-BR3	0,00340013	0	0	0	0	0	0
BR4-BR3-BR2	0	0,001844513	0	0	0	0	0
BR3-BR2-BR1	0	0	1,84103E-05	0	0	0	0
BR2-BR1-BR14	0	0	0	0,000244601	0	0	0
BR4 - BR3	0	0	0	0	493167,3834	0	0
BR3 - BR2	0	0	0	0	0	493249,369	0
BR2 - BR1	0	0	0	0	0	0	123569,8808

- **Vector de correcciones (x):** es el vector resultado que se compone de las correcciones a las coordenadas. Las coordenadas finales serán el resultado de sumarle la corrección a las coordenadas aproximadas.

	x	
dx3	0,003	m
dy3	0,001	m
dx2	0,004	m
dy2	0,006	m

- **Vector de residuos (R):** Es el vector que da correcciones a los observables. Los valores de los residuos están expresados en segundos centésimales y en metros.

$$R=A.x-u$$

R
-16,0594
4,5851
1292,9764
266,1010
0,0030
-0,0055
0,0080

- **Matriz de varianza-covarianza:**

-Matriz cofactor: $Q_u = N^{-1} = (A^T P A)^{-1}$

MATRIZ COFACTOR Q_m			
1,60437E-06	8,06825E-08	1,53823E-06	-9,40996E-08
8,06825E-08	1,78647E-07	1,62926E-07	3,32926E-08
1,53823E-06	1,62926E-07	1,63303E-06	-3,26544E-08
-9,40996E-08	3,32926E-08	-3,26544E-08	6,17191E-07

-Matriz varianza-covarianza: $\sigma Q_u = \sigma^2 Q_u$

$Q = \sigma^2 N^{-1}$	σ_{x3}	σ_{y3}	σ_{x2}	σ_{y2}
σ_{x3}	4,08927E-05	2,05646E-06	3,92067E-05	-2,39843E-06
σ_{y3}	2,05646E-06	4,55339E-06	4,1527E-06	8,48571E-07
σ_{x2}	3,92067E-05	4,1527E-06	4,16231E-05	-8,32303E-07
σ_{y2}	-2,39843E-06	8,48571E-07	-8,32303E-07	1,57311E-05

A partir de esta matriz se obtienen los errores asociados a cada incógnita del sistema:

$$\sigma x_i = \sqrt{\sigma^2 Q u_i}$$

Errores asociados con 68% de fiabilidad)					
σx_3	0,006	m	σy_3	0,002	m
σx_2	0,006	m	σy_2	0,004	m

- Estimador desviación tipo del peso unidad (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{R^T P R}{gll}}$$

$\sigma_0^2 =$	25,48824935
$\sigma_0 =$	5,048588847

Definición de las componentes del sistema matricial del ajuste altimétrico.

- **Matriz de diseño (A):** es una matriz compuesta por 17 ecuaciones de observación y 15 incógnitas.

A	BR6	BR5	BR4	BR22	BR111	BR1	BR14	BR13	BR12	BR11	BR10	BR9	BR8	BR3	BR2
BR7 - BR6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR6 - BR5	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR5 - BR4	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR4 - BR22	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR22 - BR111	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BR111 - BR1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
BR1 - BR14	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0
BR14 - BR13	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
BR13 - BR12	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
BR12 - BR11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
BR11 - BR10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
BR10 - BR9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
BR9 - BR8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
BR8 - BR7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
BR4 - BR3	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
BR3 - BR2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
BR2 - BR1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1

- **Vector de términos independientes (u):** es un vector compuesto por los desniveles y las cotas conocidas (el vértice BR7) en metros.

u	
33,536	BR7 - BR6
1,339	BR6 - BR5
1,145	BR5 - BR4
0,008	BR4 - BR22
4,052	BR22 - RBR111
-0,354	BR111 - BR1
3,380	BR1 - BR14
1,783	BR14 - BR13
-4,641	BR13 - BR12
-0,008	BR12 - BR11
-4,010	BR11 - BR10
-0,002	BR10 - BR9
-6,931	BR9 - BR8
-29,291	BR8 - BR7
0,222	BR4 - BR3
0,664	BR3 - BR2
2,820	BR2 - BR1

- $$P = \frac{1}{(\frac{e_z}{\sqrt{2}})^2}$$

[illegible]

- **Vector de correcciones (x):** es el vector resultado que se compone por las cotas ortométricas de las bases en metros.

x	
33,536	BR6
34,875	BR5
36,019	BR4
36,027	BR22
40,079	BR111
39,725	BR1
43,104	BR14
44,886	BR13
40,245	BR12
40,236	BR11
36,225	BR10
36,223	BR9
29,291	BR8
36,241	BR3
36,905	BR2

- **Vector de residuos (R):** Es el vector que da correcciones a los observables. Los valores de los residuos están expresados en metros.

$$R=A.x-u$$

R	
-0,0006	BR7 - BR6
-0,0002	BR6 - BR5
-0,0002	BR5 - BR4
-0,0001	BR4 - BR22
-0,0004	BR22 - RBR111
-0,0001	BR111 - BR1
-0,0003	BR1 - BR14
-0,0002	BR14 - BR13
-0,0006	BR13 - BR12
-0,0001	BR12 - BR11
-0,0005	BR11 - BR10
-0,0001	BR10 - BR9
-0,0011	BR9 - BR8
-0,0001	BR8 - BR7
0,0000	BR4 - BR3
0,0000	BR3 - BR2
-0,0001	BR2 - BR1

- Matriz de varianza-covarianza:

-Matriz cofactor: $Q_u = N^{-1} = (A^T P A)^{-1}$

MATRIZ COFACTOR Q_u	3,07267E-05	2,92472E-05	2,79424E-05	2,74387E-05	2,55582E-05	2,50529E-05	2,29438E-05	2,13705E-05	1,63895E-05	1,55642E-05	1,15069E-05	1,03438E-05	1,20128E-06	2,72946E-05	2,66674E-05
	2,92472E-05	3,86812E-05	3,69554E-05	3,62893E-05	3,38023E-05	3,31339E-05	3,03446E-05	2,82637E-05	2,16761E-05	2,05846E-05	1,52185E-05	1,36803E-05	1,58876E-06	3,60987E-05	3,52692E-05
	2,79424E-05	3,69554E-05	4,49046E-05	4,40952E-05	4,10732E-05	4,02611E-05	3,68718E-05	3,43433E-05	2,63387E-05	2,50124E-05	1,84921E-05	1,6623E-05	1,93051E-06	4,38637E-05	4,28558E-05
	2,74387E-05	3,62893E-05	4,40952E-05	5,1264E-05	4,47601E-05	4,30124E-05	3,93914E-05	3,66902E-05	2,81385E-05	2,67216E-05	1,97557E-05	1,77589E-05	2,06243E-06	4,38524E-05	4,36174E-05
	2,55582E-05	3,38023E-05	4,10732E-05	4,47601E-05	5,85245E-05	5,32836E-05	4,87979E-05	4,54517E-05	3,48579E-05	3,31026E-05	2,44733E-05	2,19997E-05	2,55494E-06	4,38105E-05	4,64609E-05
	2,50529E-05	3,31339E-05	4,02611E-05	4,30124E-05	5,32836E-05	5,60437E-05	5,13257E-05	4,78061E-05	3,66636E-05	3,48173E-05	2,57411E-05	2,31393E-05	2,68728E-06	4,37992E-05	4,7225E-05
	2,29438E-05	3,03446E-05	3,68718E-05	3,93914E-05	4,87979E-05	4,78061E-05	6,18759E-05	5,76329E-05	4,41999E-05	4,19742E-05	3,10323E-05	2,78957E-05	3,23967E-06	4,37992E-05	4,32494E-05
	2,13705E-05	2,82637E-05	3,43433E-05	3,66902E-05	4,54517E-05	4,78061E-05	5,76329E-05	6,49635E-05	4,98219E-05	4,73131E-05	3,49794E-05	3,14439E-05	3,65174E-06	3,73613E-05	4,02836E-05
	1,63895E-05	2,16761E-05	2,63387E-05	2,81385E-05	3,48579E-05	3,66636E-05	4,41999E-05	4,98219E-05	6,76205E-05	6,42154E-05	4,74756E-05	4,2677E-05	4,9563E-06	2,86532E-05	3,08944E-05
	1,55642E-05	2,05846E-05	2,50124E-05	2,67216E-05	3,31026E-05	3,31026E-05	4,19742E-05	4,73131E-05	6,42154E-05	6,7016E-05	4,95461E-05	4,45382E-05	5,17245E-06	2,72104E-05	2,93387E-05
	1,15069E-05	1,52185E-05	1,84921E-05	1,97557E-05	2,44733E-05	2,57411E-05	3,10323E-05	3,49794E-05	4,74756E-05	4,95461E-05	5,9725E-05	5,36883E-05	6,23509E-06	2,01171E-05	2,16906E-05
	1,03438E-05	1,36803E-05	1,6623E-05	1,77589E-05	2,19997E-05	2,31393E-05	2,78957E-05	3,14439E-05	4,2677E-05	4,45382E-05	5,36883E-05	5,63112E-05	6,53971E-06	1,80838E-05	1,94982E-05
	1,20128E-06	1,58876E-06	1,93051E-06	2,06243E-06	2,55494E-06	2,68728E-06	3,23967E-06	3,65174E-06	4,9563E-06	5,17245E-06	6,23509E-06	6,53971E-06	8,93421E-06	2,10016E-06	2,26443E-06
	2,72946E-05	3,60987E-05	4,38637E-05	4,38524E-05	4,38105E-05	4,37992E-05	4,0112E-05	3,73613E-05	2,86532E-05	2,72104E-05	2,01171E-05	1,80838E-05	2,10016E-06	5,06996E-05	4,8769E-05
	2,66674E-05	3,52692E-05	4,28558E-05	4,36174E-05	4,64609E-05	4,7225E-05	4,32494E-05	4,02836E-05	3,08944E-05	2,93387E-05	2,16906E-05	1,94982E-05	2,26443E-06	4,8769E-05	5,44946E-05

-Matriz varianza-covarianza: $\sigma_{Qu} = \sigma^2_{Qu}$

[illegible]

A partir de esta matriz se obtienen los errores asociados a cada incógnita del sistema:

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{\sigma^2 Q_{u_i}}$$

	Error asociado-68 %	
BR6	0,001	m
BR5	0,001	m
BR4	0,001	m
BR22	0,001	m
BR111	0,001	m
BR1	0,001	m
BR14	0,001	m
BR13	0,001	m
BR12	0,002	m
BR11	0,002	m
BR10	0,001	m
BR9	0,001	m
BR8	0,001	m
BR3	0,001	m
BR2	0,001	m

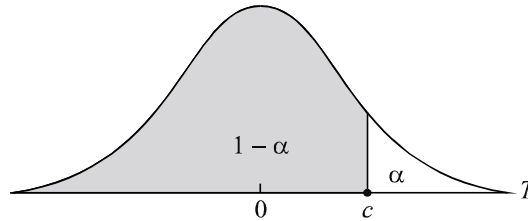
- Estimador desviación tipo del peso unidad (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{R^T P R}{gl}}$$

$\sigma_0^2 =$	0,034251016
$\sigma_0 =$	0,185070301

Anejo 3: Tabla T-student

La tabla da áreas $1 - \alpha$ y valores $c = t_{1-\alpha, r}$, donde, $P[T \leq c] = 1 - \alpha$, y donde T tiene distribución t -Student con r grados de libertad..



1 - α								
r	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

Anejo 5: Parte inglesa traducida al castellano

RESUMEN

Este trabajo nace de la necesidad de documentar gráficamente la estación de metro de Collblanc. El trabajo acontece del convenio de colaboración entre la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (EPSEB) y Transports Metropolitans de Barcelona (TMB).

Por su gran envergadura la estación se divide en dos proyectos. Por un lado el andén y zona vías y por otro el vestíbulo principal. La zona de escaleras de acceso al andén es común para los dos proyectos. El proyecto que consta de vestíbulo principal y escaleras de acceso al andén, se realiza por el alumno Alexandre Ruiz Jordana y tiene como título “Aixecament 3D d’una estació de metro a partir de núvols de punts capturats amb làser escàner terrestre (TLS)”. El proyecto que consta de andén, zona de vías y escaleras de acceso al andén, es el que se trata en esta memoria.

El objetivo de este *practicum* es realizar un levantamiento 3D de la estación de Metro de Collblanc, apoyado en la red topográfica de TMB referenciada en el sistema de referencia ED50 y en coordenadas proyectadas UTM 31N. Las cotas son ortométricas y el geoide utilizado es el UB91. La técnica de laser escáner se aplica para realizar la captura masiva de datos de la estación. Posteriormente se realiza el procesamiento de los datos espaciales, mediante el uso de *software* específico. Como resultado de este modelo tridimensional surgirán planos en planta, perfiles transversales y longitudinales, ortoimágenes y un video.

Se adjunta a la memoria Anejos y un cd donde se incluyen los cálculos y planos que han sido necesarios para la realización de este trabajo final de grado.

1 Introducción

Este proyecto se desarrolla gracias al convenio de cooperación con Transports Metropolitans de Barcelona. Esta opción es interesante para TMB, pues solo tienen el levantamiento 3D de la zona de vías, pudiendo incorporar así los datos obtenidos de la estación a su base de datos.

El objetivo es conseguir un levantamiento 3D de una estación de la red de metro de TMB, del que se obtienen planos, ortoimágenes y videos. Para ello se definen como objetivos secundarios: establecimiento de una red de apoyo, tratamiento de las nubes de puntos y generación de ortoimágenes.

Para obtener el modelo tridimensional de la estación, se emplea la técnica de láser, la cual aporta una gran definición gracias a la gran cantidad de puntos obtenidos y un importante ahorro de tiempo en la toma de datos. La red topográfica existente sirve de apoyo para referenciar todo el trabajo en el sistema de referencia ED50, mediante coordenadas proyectadas UTM 31N y cota ortométrica (referenciada al nivel medio del mar en Alicante).

El levantamiento 3D de la estación se divide en 2 proyectos. Por un lado el andén y zona vías y por otro el vestíbulo principal. La zona de escaleras de acceso al andén es común para los dos proyectos.

El proyecto que consta de andén, zona de vías y escaleras de acceso al andén, es el que se trata en esta memoria. El proyecto que consta de vestíbulo principal y escaleras de acceso al andén, se realiza por el alumno Alexandre Ruiz Jordana.

Como resultado se obtiene un modelo tridimensional georreferenciado del que se extraen planos, ortoimágenes y un video que permite percibir información de la estación. Los resultados obtenidos son útiles para Transports Metropolitans de Barcelona, con ellos actualiza y georreferencia la información gráfica de esta estación

2 Situación e historia de la estación

La estación de metro escogida para la realización del proyecto es la de Collblanc. Ésta, forma parte de la línea 5 del Metro de Barcelona.

Se proyectó en el año 1954, cuando el ayuntamiento de Barcelona planeaba la creación de una nueva línea de metro. El 7 de noviembre de 1964, la empresa *Dragados y Construcciones* inició la construcción del tramo entre Sants y Collblanc, anteriormente llamada San Ramón. Finalmente el 3 de noviembre de 1969 se inauguró la línea denominada Transversal Alto, actual línea 5, que discurría entre las estaciones de Rambla Catalunya (actualmente Diagonal) y San Ramón (actualmente Collblanc).

Como consecuencia de una prolongación de la línea hasta Pubilla Cases en el año 1973, pasó a llamarse línea V.

En 1982 la estación cambió su nombre por Collblanc y la línea V adoptó la numeración arábica y pasó a nombrarse Línea 5.



Imagen 2.1: Fotografía de la estación de Collblanc del año 1968.

Actualmente, la línea 5 del Metro de Barcelona empieza en Cornellà y finaliza en la estación de Vall d'Hebron, dispone de 26 estaciones y una longitud de 18,9 km.

Línea 5 - Metro de Barcelona 2014



Imagen 2.2: Estaciones línea 5 metro de Barcelona.



Imagen 2.3: Recorrido línea 5 (visor TMB).

La estación de Collblanc se encuentra situada bajo la Carretera de Collblanc, entre Travessera de les Corts y la calle Francesc Layret. Consta de dos vestíbulos, uno en cada extremo. El primero se encuentra en el lado este y dispone de dos accesos, el acceso 1 es por la calle Francesc Layret y el acceso 2 es por la Calle Doctor Martí Julià. El segundo vestíbulo se sitúa en el lado oeste y dispone de un único acceso por la Calle Sant Ramón (acceso 3). Se observan los diferentes accesos en la imagen 2.5.



Imagen 2.4: Imagen satélite de la estación Collblanc. (GoogleMaps).

Los dos vestíbulos disponen de expendedoras y validadoras de acceso. El acceso de los vestíbulos a la zona de túneles es mediante escaleras y escaleras mecánicas. La zona de paso del tren está formada por dos vías con andenes laterales sin ningún tipo de separación entre éstas.



Imagen 2.5: Imagen de los accesos de la estación (VISSIR3 ICGC).

3 Trabajos de campo

Se realiza una inspección de la zona de trabajo, para llevar a cabo el proyecto.

El trabajo de campo se divide en dos partes: trabajos previos, que permite definir la metodología a seguir y los recursos necesarios y toma de datos, tanto topográficos como láser escáner.

3.1 Trabajos previos

Con el fin de planificar los trabajos necesarios se realiza una visita a la estación. Durante ésta se estudia la posible ubicación de los estacionamientos con el escáner y la instalación de puntos de control (dianas) necesarios para georreferenciar la nube capturada con láser escáner.

Se estudia la ubicación de los estacionamientos con láser escáner. Para llevar a cabo el posicionamiento del aparato se consideran las zonas que tienen partes ocultas y una distancia máxima entre escaneos no superior a 20 metros.

Las dianas se imprimen en papel y tienen tres tamaños, de 12 x 12 cm 8,5 x 8,5 cm y 6 x 6 cm. La elección del tamaño se realiza teniendo en cuenta la distancia a la que esté el escáner, a más distancia mayor debe ser la diana. Se planifica la colocación de las dianas, para ello se tiene en cuenta que en cada estacionamiento del escáner es necesario visualizar un mínimo de cuatro dianas. Posteriormente, se colocan las dianas en las posiciones representadas en la imagen 3.1.3.



Imagen 3.1.1: Tipo de dianas empleadas.



*Imagen 3.1.2: Izquierda: Diana G1 colocada en la parte inferior del andén.
Derecha: Diana M3 colocada en la parte superior de la bóveda al inicio de las escaleras.*

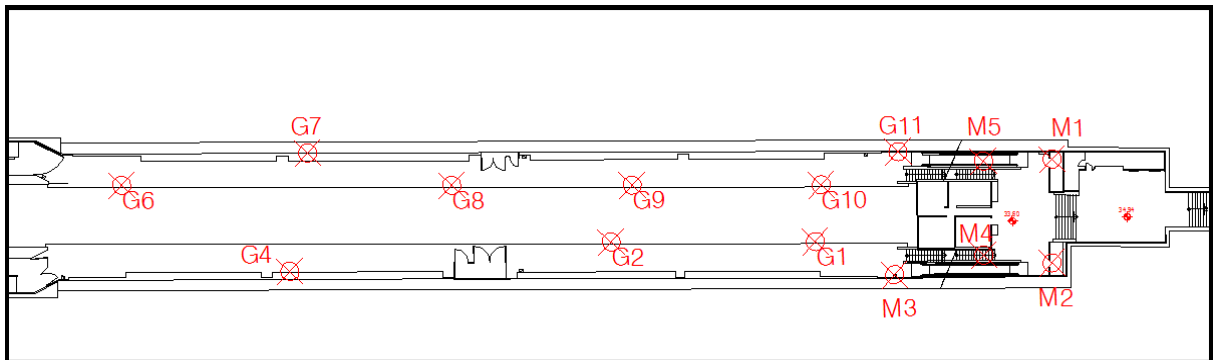


Imagen 3.1.3: Plano situación dianas.

3.2 Toma de datos

-Red topográfica

Con el fin de dar coordenadas a las dianas que permitan georreferenciar el trabajo, se observan dos poligonales, una principal cerrada y otra encuadrada sobre esta, enlazadas con las bases de la red topográfica de TMB.

Desde cada una de las bases donde se estaciona, se efectúan lecturas a todos los vértices posibles de las poligonales. Estas se realizan un mínimo de tres veces con el fin de evitar errores que puedan surgir. Las visuales se efectúan siguiendo la regla de Bessel y se realizan observaciones recíprocas, para obtener dos medidas entre los vértices.

La poligonal cerrada es el itinerario principal que recorre toda la estación, pasando por el exterior. Está compuesta por 15 bases, su inicio es BR7 y su referencia angular es BR72. Los vértices BR7 y BR72 forman parte de la Red de TMB y se consideran fijas.

Tabla 3.2.1: Coordenadas UTM (ED50) 31N y cotas ortométricas, unidades en metros de los vértices BR7 y BR72.

	X	Y	H
BR72	426405,336	4581045,735	29,257
BR7	426484,392	4581051,873	29,090

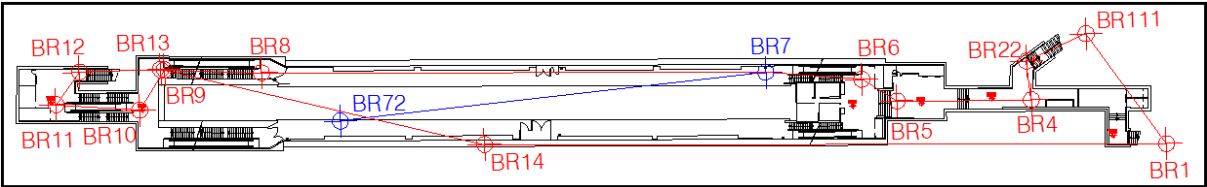


Imagen 3.2.1: Imagen poligonal cerrada.

La poligonal encuadrada es el itinerario secundario que recorre el vestíbulo principal y el acceso de calle. Está compuesta por 6 bases, su inicio es BR4 y su referencia es BR5 y pasa por las diferentes bases intermedias, su final es BR1 y tiene cierre angular en BR14.

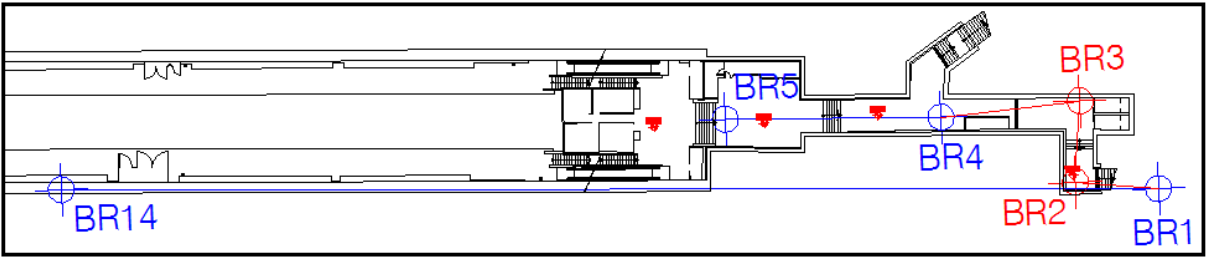


Imagen 3.2.2: Imagen poligonal encuadrada.

Además de las dos poligonales también se realizan estacionamientos libres para poder dar coordenadas a algunas de las dianas que, desde los vértices de las poligonales, no son visibles. El instrumento que se emplea en la observación es una estación total Topcon GPT 9001A, cuyas características se recogen en la tabla 3.2.2.

Tabla 3.2.2: Características de la estación.

Características de la estación		
Aumentos	30 X	
Sensibilidad	3 cc	
Apreciación	6 cc	
Sensibilidad nivel	8'	
Precisión estación	2 ''	
Error en distancia	2 mm	+/- 2 ppm

-Láser escáner

La tecnología láser escáner utiliza ondas laser para determinar la distancia a un objeto. Esta permite capturar una nube de puntos de alta densidad rápidamente, que tras su tratamiento, da como resultado un modelo tridimensional, del que se pueden derivar planos CAD, ortoimágenes, video, etc.

El láser escáner que se utiliza es el FARO Focus 3D S 120. (Anejo 1: especificaciones FARO). Este sensor emplea el método tiempo de vuelo, que se basa en el cálculo de la distancia en función del tiempo transcurrido, entre la emisión y la recepción del rayo.

La manera de trabajar es semejante a la estación total. Se estaciona el escáner y se hace el escaneo de la zona de interés, siempre solapando zonas consecutivas e intentando cubrir zonas ocultas desde algún estacionamiento. Los escaneos son estáticos.

La unión de los diferentes escaneos se realiza mediante dianas y esferas. Las esferas no tienen coordenadas, únicamente se utilizan para la creación de un modelo continuo. Las dianas tienen coordenadas, con estas se georreferencia el modelo. Estos elementos sirven como elementos comunes que se repiten en las diferentes zonas escaneadas y por tanto como elementos de unión para los diferentes archivos generados con los escaneos.

Las dianas se radian desde los vértices de la red topográfica con la estación total. Así, posteriormente, se pueden georreferenciar los escaneos realizados.

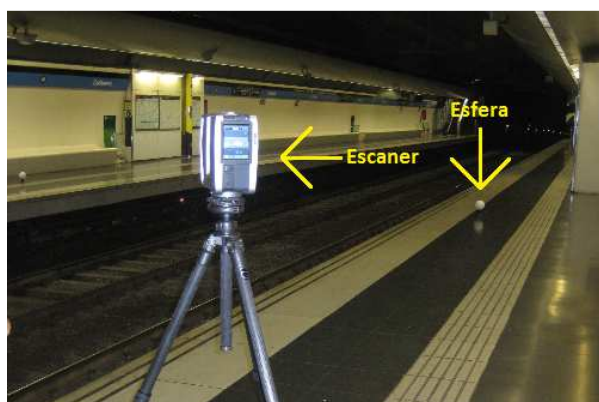


Imagen 3.2.3: Imagen de Láser escáner con las esferas colocadas.

En toda la estación se realizan un total de 25 escaneos. Para cada escaneo el tiempo de registro es de aproximadamente 9 minutos que se divide en 6 minutos para escanear la zona y 3 minutos para realizar las fotografías. En este proyecto se utilizan 13 de ellos.

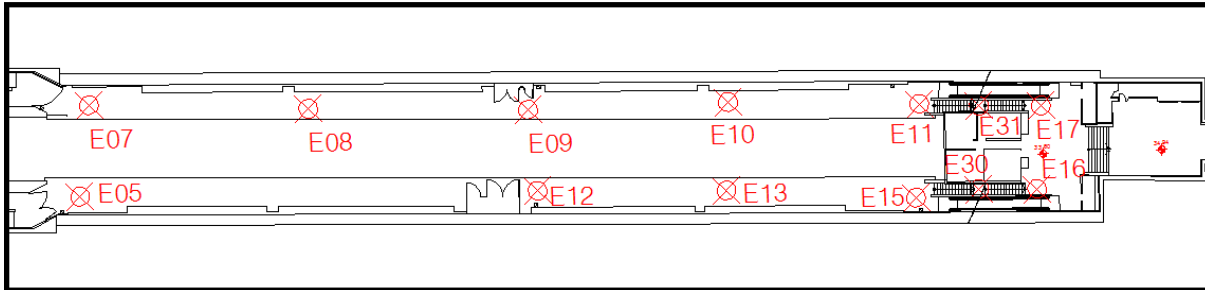


Imagen 3.2.4: Plano situación estacionamientos escaneos (zona de vías, andén y escaleras de acceso).

4 Trabajos de gabinete

A continuación se describen los trabajos que se realizan en gabinete con los datos obtenidos en los trabajos de campo y las bases proporcionadas por TMB.

Todas las coordenadas están en UTM 31N sistema de referencia ED50 y cotas ortométricas. Se utiliza este sistema ya que es el que está establecido en la red topográfica de TMB.

4.1 Cálculo de los itinerarios

Para calcular las coordenadas aproximadas de los vértices, se parte de los datos observados en campo.

-Cálculo planimétrico

La poligonal cerrada tiene como vértice fijo BR7 y BR72, al ser dos vértices de coordenadas conocidas se puede calcular el azimut entre ellos y saber la desorientación del vértice BR7, Σ_{BR7} . Con esta desorientación se calculan los azimuts.

$$\sum_{BR7} \theta_{BR7}^{BR72} = \theta_{BR7}^{BR72} - LH_{BR7}^{BR72}$$

A partir de los azimuts y las distancias reducidas (D_r) de cada tramo se obtienen los incrementos en X e Y para cada vértice (Δx e Δy).

$$\Delta x = D_r \cdot \sin \theta$$

$$\Delta y = D_r \cdot \cos \theta$$

Una vez se obtienen las coordenadas aproximadas, se calcula el coeficiente de anamorfosis, K, de cada una de los tramos para así obtener las distancias UTM (D_{UTM}) reducidas a la proyección. Con estas distancias, se calculan de nuevo las coordenadas aproximadas de los diferentes vértices.

Para el cálculo de la poligonal encuadrada se utilizan las coordenadas compensadas que se obtienen tras el ajuste del itinerario cerrado por mínimos cuadrados.

Tabla 4.1.1: Coordenadas UTM 31N (ED50) aproximadas de las poligonales.

Vértice	X(m)	Y(m)
BR7	426484,392	4581051,873
BR6	426502,112	4581049,889
BR5	426508,509	4581045,604
BR4	426533,324	4581044,907
BR22	426532,691	4581052,147
BR111	426543,915	4581056,839
BR1	426558,038	4581035,795
BR14	426431,858	4581040,401
BR13	426372,451	4581056,579
BR12	426357,418	4581056,681
BR11	426352,859	4581050,777
BR10	426368,294	4581049,168
BR9	426373,168	4581056,507
BR8	426391,085	4581055,283
BR7	426484,387	4581051,903
BR3	426549,361	4581046,177
BR2	426548,488	4581036,905

-Cálculo altimétrico

Para conseguir las cotas de cada vértice, se calculan los incrementos de altura (Δz). Con estos incrementos sumados a la cota ortométrica de BR7 se obtienen las cotas aproximadas de cada vértice. Se ajustan las dos poligonales en bloque.

Tabla 4.1.2: Cotas aproximadas de las poligonales.

Vértice	H(m)
BR7	29,090
BR6	33,534
BR5	34,873
BR4	36,019
BR22	36,026
BR111	40,079
BR1	39,721
BR14	43,094
BR13	44,877
BR12	40,235
BR11	40,224
BR10	36,212
BR9	36,209
BR8	29,279
BR7	29,076
BR3	36,240
BR2	36,904

4.2 Errores y tolerancias

Los errores y tolerancias en planimetría y altimetría se estudian por separado. Una vez los resultados de los errores de cierre que se obtienen están dentro de la tolerancia, que lo están, se procede a la compensación.

-Planimetría

Al realizar el cálculo de los errores en planimetría se consideran una serie de errores accidentales, a partir de los cuales se calcula la tolerancia angular y la tolerancia en coordenadas.

El error angular (e_a) es la componente cuadrática de los errores de verticalidad, de puntería, de dirección y de lectura.

$$\text{Tolerancia angular} \quad \longrightarrow \quad T \leq e_a \sqrt{2n}$$

siendo “ n ” el nº de tramos y “ e_a ” el error angular

$$\text{Tolerancia en coordenadas} \quad \longrightarrow \quad T = \sqrt{E_t^2 + E_l^2} \quad E_{Total} \leq T$$

siendo “ E_t ” el error transversal y “ E_l ” el error longitudinal

$$E_{Total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

siendo “ E_{Total} ” el error en coordenadas

El error de cierre angular para la poligonal cerrada es de 0,0123 g y para la poligonal encuadrada es de 0,0153 g, sus respectivas tolerancias son 0,0326 g y 0,0468 g.

El error de cierre en coordenadas para la poligonal cerrada es de 0,030 m y para la poligonal encuadrada es de 0,011 m, sus respectivas tolerancias son 0,162 m y 0,098 m.

Esta tolerancia se obtiene por las características del instrumental y por el método empleado. Puesto que los errores de cierre que se producen entran en la tolerancia se puede realizar la compensación.

-Altimetría

Al realizar el cálculo de los errores en altimetría se ha considerado una serie de errores accidentales.

El error máximo en Z (e_z) es la componente cuadrática de los errores e_{tD} , e_m , e_{tV} y e_i .

$$e_z = \sqrt{e_{tD}^2 + e_m^2 + e_i^2 + e_{tV}^2}$$

Siendo “ e_{tD} ” error en el término t debido al error en la medida de la distancia, “ e_m ” el error de altura de mira, “ e_i ” el error en la medida de altura de instrumento y “ e_{tV} ” error en el término t debido al error en la medida del ángulo vertical.

$$T \leq e_z \sqrt{2} \rightarrow \text{Entre los desniveles recíprocos}$$

El error de cierre en cota para la poligonal cerrada es de 0,014 m y para la poligonal encuadrada es de 0,001 m, sus respectivas tolerancias son 0,024 m y 0,009 m.

Esta tolerancia se obtiene por las características del instrumental y por el método empleado.

Puesto que los errores de cierre que se producen entran en tolerancia, se puede realizar la compensación.

El ajuste que se aplica es por el método de observaciones indirectas de mínimos cuadrados.

11 Planos

- 1-Estación Collblanc L5 FMB Planta
- 2-Estación Collblanc L5 FMB Perfil longitudinal, Sección A-A'
- 3-Estación Collblanc L5 FMB Perfil longitudinal, Sección B-B'
- 4-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal PK 0+000-PK 0+025
- 5-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal PK 0+030-PK 0+055
- 6-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal PK 0+060-PK 0+085
- 7-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal PK 0+090-PK 0+115
- 8-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal PK 0+120
- 9-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal 1
- 10-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal 2
- 11-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal 3
- 12-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal 4
- 13-Estación Collblanc L5 FMB Perfil transversal 5

